



**Universidad**  
Zaragoza



## Proyecto Fin de Carrera

# APLICACIÓN PARA EL AJUSTE DE LOS EQUIPOS DE ENSAYO ELÉCTRICOS DE HUECOS DE TENSIÓN Y SOBRETENSIONES

Autor/es

**PEDRO PITARCH GARGALLO**

Especialidad

**Electricidad**

Director/es y/o ponente

**DIEGO LÓPEZ ANDIA**

Facultad / Escuela

**EINA UNIZAR**

Año

**MARZO 2013**

El objetivo de este trabajo ha sido crear una herramienta para el cálculo de ensayos de huecos de tensión y sobretensión de los equipos MEGHA y QuEST LAB, siendo esta capaz de calcular las caídas de tensión o sobretensión con los parámetros de los ajustes característicos de estos equipos. La aplicación desarrollada consta de varias pantallas hechas en VBA Excel.

La aplicación inicialmente solicita la introducción de los datos de la instalación y ajustes de los equipos de ensayos por parte de usuario al programa, el programa se encarga de enviar los datos a Excel y calcular los resultados del ensayo con los parámetros seleccionados. En la pantalla final se visualizan los resultados y al final la aplicación proporciona los parámetros de ensayo a introducir en el equipo de ensayos real en un informe de ensayo en campo en formato Word.

El objetivo principal de la aplicación creada en este proyecto consiste en facilitar el ajuste en campo de los equipos de ensayo generadores de huecos de tensión o sobretensiones.

En la memoria se explican las diferentes normas de ensayos que se pueden realizar con los equipos de ensayo y se hace una breve introducción a los ensayos de huecos de tensión en el contexto de la energía eólica, una descripción eléctrica y funcional de los equipos de ensayo y se completa con un manual de usuario de la aplicación con dos casos prácticos hechos para los equipos MEGHA y QuEST LAB.

En definitiva con este proyecto se pretende además de crear la aplicación y explicar el manejo de esta, explicar brevemente la utilidad de los equipos de ensayo que implementa la aplicación para mejorar la calidad en el suministro en la energía eólica, que es uno de los aspectos que mayor importancia tiene en el desarrollo de este tipo de energía.

## Índice de contenidos

1.	Introducción.....	1
1.2.	Objetivo y alcance del proyecto: .....	1
1.2.	Contexto en que se realiza: .....	2
1.3.	Descripción del proyecto: .....	3
2.	Contexto eólica .....	4
2.1.	Energía que se aprovecha del viento: .....	4
2.2.	Tipos de aerogeneradores: .....	4
2.3.	Componentes de un aerogenerador: .....	6
2.4.	Instalación eléctrica del parque eólico: .....	8
3.	Calidad de red.....	10
3.1.	Calidad de red. Norma IEC 21400-21:.....	10
3.2.	Huecos de tensión:.....	12
3.3.	Ensayo en aerogeneradores: .....	14
3.3.1	PO 12.3 (Caso español): .....	14
3.3.2	Grid Codes Internacionales: .....	17
4.	Equipos de ensayo .....	19
4.1.	MEGHA: .....	19
4.2.	QuEST lab: .....	22
4.3.	Sistemas de control:.....	24
5.	Procedimiento ajuste de ensayo.....	30
5.1.	Descripción del proceso con equipo de ensayo MEGHA: .....	30
5.2.	Descripción del proceso QuEST lab:.....	35
5.3.	Caso práctico: .....	38
5.3.1	Ensayo de hueco de tensión:.....	41
5.3.2	Ensayo de sobretensión: .....	48

6.	Conclosión.....	55
6.1.	Síntesis:.....	55
6.2.	Opinión personal: .....	57
6.3.	Líneas futuras: .....	57
7.	Bibliografía y otras fuente documentales .....	58
	Anexo A. Norma P.O.12 .....	59
	Anexo B. Código programa VBA .....	61

## 1 INTRODUCCION

### 1.1 Objetivo y alcance del proyecto.

El objetivo del proyecto que he realizado consiste en analizar el sector de los sistemas de energía renovable y desarrollar una nueva herramienta que permita configurar de forma rápida en campo los equipos de ensayo eléctrico en aerogeneradores encargados de verificar el comportamiento de aerogeneradores en su conexión a red.



*Figura 1.1: Camión que contiene el generador QuEST LAB.*

El incremento de la potencia de origen eólico en la red eléctrica aumentó, de manera notable hasta el año 2007. El sector eólico español registró el mayor crecimiento del mundo, con 2.361 MW de nueva conexión a la Red, superando los 9.000 MW de potencia instalada. En los planes del Plan de Energías Renovables 2005-2010 la energía eólica era el área que mayor desarrollo esperaba tener en España, contando con importantes iniciativas empresariales en un mercado de excelentes expectativas y con muy buenas perspectivas de evolución para el futuro inmediato, una normativa favorable y un amplio potencial eólico aún por explotar. Hoy en día, el sector eólico en España se encuentra parado tras la decisión del gobierno, el 28 de Enero de 2012, de suprimir las tarifas que antes otorgaban a las energías renovables, cuya finalidad no era otra que la de promover su uso en nuestro país. La energía eólica es una fuente de energía de carácter renovable que depende del viento para poder obtener energía. Esta dependencia es importante porque precisamente cuando las condiciones climatológicas son más extremas (mucho frío o mucho calor) y por lo tanto la demanda eléctrica es alta, es cuando normalmente menos viento hay.

El otro principal inconveniente es el comportamiento de los aerogeneradores eólicos actualmente en funcionamiento en el sistema eléctrico español frente a los huecos de tensión. Los huecos de tensión son la reducción repentina y normalmente muy breve, de la tensión de un nudo ocasionada por una falta a tierra en algún lugar de la red de transporte. Este comportamiento puede convertir un incidente como una falta a tierra

que es un incidente muy habitual (hasta 2000 faltas al año) y que no tiene mayor importancia, en una pérdida de generación de graves consecuencias para el sistema en su conjunto.

En el presente proyecto además de la herramienta creada en Visual Basic he realizado un análisis de los generadores de huecos de tensión móviles que se encargan del estudio de estas caídas de tensión y que son capaces de provocar huecos de tensión en bornes del aerogenerador para verificar el adecuado comportamiento de las turbinas para satisfacer las normativas vigentes como el P.O. 12.3 español o los diferentes Grid Codes internacionales.

## **1.2 Contexto en que se realiza.**

En este proyecto vamos a analizar dos laboratorios móviles de ensayos eléctricos de huecos de tensión denominados MEGHA y QuEST LAB diseñados por la empresa 4FORES y la cual me ha abierto sus puertas para poder estudiar en detalle ambos equipos. 4FORES es una empresa de base tecnológica cuyo objetivo principal es la realización de proyectos I+D+i sobre sistemas de energías renovables y su transferencia tecnológica al sector industrial para hacerlo más eficiente y garantizar la seguridad en el mismo.

El sistema consiste en un laboratorio móvil que dispone de un divisor inductivo que se conecta en los bornes del aerogenerador pudiendo ensayar huecos de tensión en función de los ajustes seleccionados en el mismo.

Los ajustes se seleccionan en función del tipo de ensayo que se quiere realizar, el generador de huecos de tensión MEGHA se compone de una conexión aerogenerador-red, una inductancia de choque con 42 tomas de ajuste rápido para limitar la corriente de cortocircuito y ajustar la potencia nominal de cortocircuito, un transformador con doble devanado primario y secundario y resistencias en la rama de falta a tierra ajustables de forma remota entre siete valores distintos.

El otro equipo de ensayo es el laboratorio móvil QuEST LAB. Este equipo, además de huecos de tensión es capaz de realizar sobretensiones y saltos de fase. El QuEST LAB dispone de más de mil ajustes distintos para acoplarse a los distintos ensayos que queramos realizar. El esquema consiste en una conexión aerogenerador-red, una inductancia de choque con múltiples tomas de ajuste rápido para limitar la corriente de cortocircuito y ajustar la potencia de cortocircuito al valor deseado. También tiene un transformador serie (en paralelo con inductancia) que puede trabajar como transformador reductor o elevador en función de si queremos ensayar huecos de tensión o sobretensiones respectivamente. En la rama de falta es posible conectar un equipo externo (ADAPTEST) que posibilita alcanzar profundidades de hueco por debajo del 35% de la tensión nominal (límite de la profundidad de hueco alcanzable por el equipo QuEST LAB sin la conexión del equipo externo).

### **1.3 Descripción del proyecto.**

El proyecto consta de siete partes diferenciadas, en primer lugar la introducción que abordamos en este punto para contextualizar el tema del proyecto.

En el capítulo 2 se describe brevemente el contexto de los generadores de huecos de tensión en el mundo de la energía eólica en general.

En el tercer punto se aborda el por qué de los huecos de tensión y se analiza profundamente el ensayo de huecos de tensión para la adaptación de los aerogeneradores a la normativa. En este apartado se estudian algunos de los procedimientos regulativos como el P.O. 12.3 y los principales Grid Codes internacionales los cuales establecen los requisitos a cumplir ante faltas de huecos de tensión.

En el punto 4 del proyecto se hace un análisis del funcionamiento de los equipos MEGHA y QuEST LAB respectivamente, sus esquemas, protecciones de que disponen, etc.

En el punto 5 del mismo se describe un caso real de aplicación de los ajustes obtenidos mediante la aplicación creada para un caso particular con ambos generadores de perturbaciones (MEGHA y QuEST LAB).

En este capítulo también se describe una instalación ejemplo de un parque eólico donde se realizaran los ensayos así como los cálculos de ajustes en que se basa la aplicación VBA, explicando el procedimiento llevado a cabo en la programación del mismo y las características del propio programa.

El proyecto finaliza exponiendo las conclusiones que se extraen de la ejecución del propio proyecto.

Finalmente se incluyen como anexos el manual básico de Visual Basic, el código del programa desarrollado y la normativa P.O. 12.3.

## **2. CONTEXTO ENERGÍA EÓLICA**

### **2.1 Energía que se aprovecha del viento.**

La energía eólica es la energía más madura y desarrollada (de las energías de origen renovable). Genera electricidad a partir de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire. Se trata de una fuente de energía limpia e inagotable, que reduce la emisión de gases de efecto invernadero y preserva el medioambiente.

La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. Desde principios del siglo XX se produce energía a través de los aerogeneradores. La energía eólica mueve una hélice compuesta por un conjunto determinado de palas y, mediante un sistema mecánico, transmite el movimiento de giro al rotor de un generador que produce energía eléctrica.

La energía que produce el viento se asocia directamente con la energía cinética del viento. Esta creación o circulación del viento se debe a la diferencia de temperaturas existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera. Las masas de aire más caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado por las masas de aire circundante, más frío, y por tanto más denso. Podemos concluir que el viento es la variante de estado del aire, que estudia el movimiento en el que se considera su velocidad y dirección de la componente horizontal. Es importante al hacer un estudio de la zona en la que se obtiene la energía eólica, y tener en cuenta que tipos de vientos existen y los efectos que puede ocasionar.

### **2.2 Tipos de aerogeneradores.**

Un aerogenerador es un generador de electricidad activado por la acción del viento. Se basa en el principio de funcionamiento de los antiguos molinos de viento que se empleaban para la molienda.

En este caso, la energía mueve la hélice y, a través de un sistema mecánico de engranajes, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sofisticado sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la de la red (en el caso de España a 50Hz).

La primera clasificación, se basa en la posición de su eje principal, existiendo de eje horizontal y eje vertical. Los aerogeneradores de eje horizontal, se les llama de esta forma ya que poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Necesita un control de orientación al viento, por ejemplo un motor eléctrico para aerogeneradores de más de 50 kW. Los elementos de conexión, multiplicador y generador, se encuentran a la altura del rotor en la góndola situado en lo alto de la torre. La disposición de las

palas, puede ser de barlovento o a sotavento. Otra posible clasificación de este tipo de aerogeneradores, es en función del número de palas.



*Figura 2.1: Ejemplo de aerogeneradores con diferente número de palas*

Los aerogeneradores de eje vertical, tiene los ejes principales perpendiculares al suelo. Una ventaja de este uso es que captan el viento en cualquier dirección, por lo tanto no necesita un control de orientación, otra ventaja es que el enlace con los multiplicadores y generadores se realiza en el suelo y por lo tanto tienen un coste menor y una mayor sencillez a la hora de su montaje. La causa de no utilizar más de estos tipos de aerogeneradores es que poseen una eficiencia notablemente menor que los aerogeneradores de eje horizontal.



*Figura 2.2: Aerogenerador de eje vertical*

## 2.3 Componentes de un aerogenerador.

A continuación, se explicará de forma breve los elementos más importantes de los aerogeneradores, estos son: las palas, el buje, el equipo multiplicador de potencia, los ejes de alta y baja velocidad, el generador, el controlador de la torre.

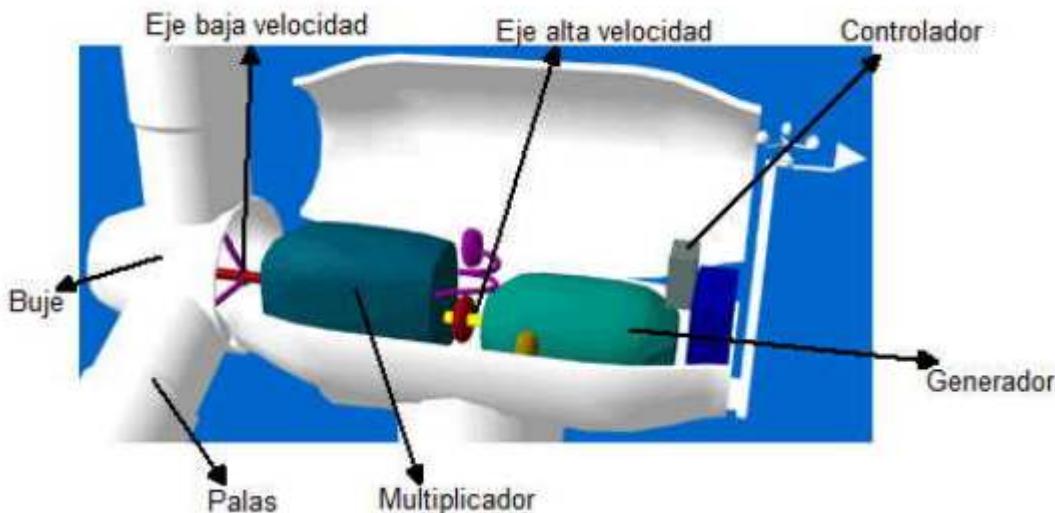


Figura 2.3: Componentes de un aerogenerador

Las palas del rotor: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. Para hacernos una idea de las dimensiones de una pala, actualmente rondan alrededor de los 30m.

Buje: es el elemento que realiza la unión de todas las palas del aerogenerador. Se monta sobre el eje de baja velocidad, desde el que se transmite el par motriz a la transmisión de potencia del aerogenerador.

Equipo multiplicador de potencia: permite que el eje de alta velocidad, gire 50 veces más rápidamente que el eje de baja velocidad.

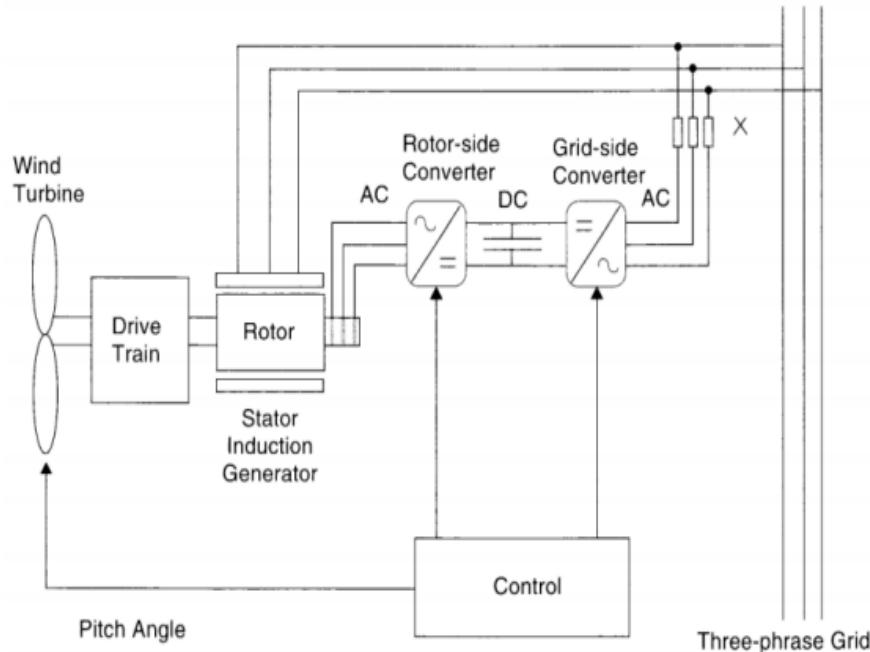
Ejes de alta y baja velocidad: el eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador.

El eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. Este freno se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante el proceso de mantenimiento de la turbina.

Generador: también conocido como generador asincrónico o de inducción. Está formado por una máquina encargada de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Se compone de un rotor, que es la parte móvil y encargada de generar un campo magnético variable al girar las palas, y un estator que se trata de la parte fija sobre la que se genera la corriente eléctrica inducida.

Generador de inducción doblemente alimentado (DFIG): se utiliza en turbinas eólicas, su principal capacidad es que suministra potencia a tensión y frecuencia constante a

medida que la velocidad del rotor varía. La configuración del DFIG también ofrece la posibilidad de controlar el factor de potencia del sistema. El funcionamiento del DFIG se basa en el generador de inducción trifásico con rotor devanado en el cual el rotor es alimentado mediante algún convertidor de frecuencia para que opere con estabilidad aún a velocidad variable.



**Figura 2.4:** Esquema del generador asincrónico doblemente alimentado.

El principio de operación es como muestra la figura 2.4: la salida del generador se conecta directamente a la red eléctrica, y a su vez se establece un lazo de realimentación por medio de algún convertidor de frecuencia con el objeto de controlar el sistema de excitación del rotor. Este lazo de realimentación presenta dos ventajas muy importantes:

1. Como el voltaje del rotor es controlado por un convertor electrónico de potencia, el generador de inducción es capaz de importar y exportar a su vez potencia reactiva. Esto tiene importantes consecuencias para la estabilidad del sistema eléctrico y le permite, por lo tanto a la máquina permanecer conectada al sistema aún en presencia de perturbaciones severas.
2. Además, como la frecuencia del rotor es controlada, esto habilita a la máquina de inducción a mantenerse sincronizada con la red eléctrica aun cuando la turbina de viento varíe su velocidad.

**Generador de imanes permanentes (PMG):** En aerogeneradores de pequeña potencia (hasta 12 kW) se utilizan mayormente generadores síncronos de imanes permanentes. Esto es debido a su robustez y su bajo mantenimiento, evitan el uso de cajas multiplicadoras, aunque su precio es algo mayor. Este tipo de generadores se está utilizando cada vez más en aerogeneradores de gran potencia debido a lo reducido de su peso y volumen al utilizar imanes de alto magnetismo. En un PMG la excitación es constante por lo que al cargar el generador cae la tensión sin opción de regulación.

Controlador: el controlador electrónico tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier anomalía, automáticamente se para el aerogenerador y llama al ordenador del operario, de la turbina a través de un enlace telefónico o módem.

La obtención de la potencia de un aerogenerador, se consigue convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y de la velocidad del viento.

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. Por lo tanto la energía cinética del viento depende de la densidad del aire. A presión atmosférica normal y a 15°C la densidad del aire de 1,225Kg/m<sup>3</sup> aunque éste valor disminuye ligeramente con el aumento de la humedad.

En referencia al área de barrido de las palas, ésta determina cuanta energía del viento es capaz de capturar el aerogenerador. A mayor diámetro de las palas, la superficie es mayor y por lo tanto la energía que absorbe el rotor es mayor.

La velocidad del viento es un parámetro muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. A mayor velocidad de viento, la energía que capte el aerogenerador es mayor.

La energía cinética del viento es capturada por el aerogenerador gracias a las palas del rotor. Cuando el viento incide contra las palas, éstas giran en torno el eje del rotor y por lo tanto hacen girar el eje de baja velocidad al que está acoplado el buje. Éste gracias al multiplicador hace girar el eje de alta velocidad al que esta acoplado el generador, que es el productor de energía eléctrica.

## **2.4 Instalación eléctrica del parque eólico.**

El sistema eléctrico de un parque eólico transfiere la energía producida por cada aerogenerador hacia la red de la compañía eléctrica que suministre a las poblaciones más cercanas. Las características y distancia de la red en el punto de funcionamiento condicionarán el diseño y trazado de la instalación de evacuación eléctrica de cada parque. El sistema eléctrico de un parque eólico se compone de los siguientes elementos:

-Instalación eléctrica de Baja Tensión (BT) puede ser interna a cada aerogenerador o bien externa, si es interna consiste en unos circuitos que conectan la salida del generador con el centro de transformación, también interno, y que eleva el potencial eléctrico de salida desde Baja Tensión (690V) hasta Media Tensión (20kV). Este transformador suele ser de tipo seco, al estar localizado dentro de la torre. Adicionalmente existe otro circuito, de control (comunicaciones) y servicios auxiliares, para la alimentación de los equipos de regulación, motores de orientación, unidad hidráulica y otras herramientas de alumbrado y maniobra de la góndola y la torre.

La red de Media Tensión (MT) es subterránea y conecta los aerogeneradores entre sí y la subestación del parque eólico.

La toma de tierra es específica para cada aerogenerador, que debe estar provisto de una zanja de 1m de profundidad por 0,40m de anchura, puesta con tierra vegetal y material procedente de la propia excavación.

La transformación de los niveles de MT a líneas de transmisión de valores de tensión superiores se llevan a cabo mediante un subestación colectora, que permite ajustar las mediadas de energía eléctrica de la compañía distribuidora de electricidad de la zona (AT). La tipología más común de subestación transformadora MT/AT consiste en una estructura prefabricada mixta (intemperie-interior), para lo cual sólo será necesario el acondicionamiento del firme sobre el que se vaya a instalar.

La forma más eficiente de evacuar la energía producida por el parque eólico es la alta tensión, ya que se disminuyen las perdidas a causa de caídas de tensión por resistencia y reactancia. Las condiciones de conexión tendrán en cuenta la tensión nominal y la máxima de servicio, potencia máxima de cortocircuito admisible, capacidad de transporte de la línea, tipo de red aérea o subterránea, sistema de puesta a tierra.

### **3. CALIDAD DE RED**

#### **3.1 Calidad de red. Norma IEC 61400-21.**

En este capítulo se presentan las condiciones que deben exigirse a los sistemas de generación para asegurar unos mínimos niveles de calidad en la energía que producen y que vierten a la red. Para evaluar esta calidad de energía eléctrica producida y caracterizar la calidad de la potencia que un aerogenerador entrega a la red existen varias normas de referencia que describen las especificaciones relativas al aerogenerador en cuanto a la calidad de la tensión, respuesta entre caídas de tensión, control de potencia, protección de la red o reconexión.

En cuanto a la calidad de tensión debe tenerse en cuenta tanto el funcionamiento en régimen continuo y la respuesta ante variaciones en la tensión de red. En el primero de ellos el coeficiente de flicker calculado en el aerogenerador en funcionamiento continuo debe estar por encima del percentil 99% para los ángulos característicos de fase de impedancia de la red de 30°, 50°, 70° y 85° para diferentes velocidades de viento. Estas características deben establecerse con el aerogenerador funcionando con una potencia reactiva lo más próxima a cero, es decir, si es posible el control del valor de la potencia reactiva debe fijarse para Q=0.

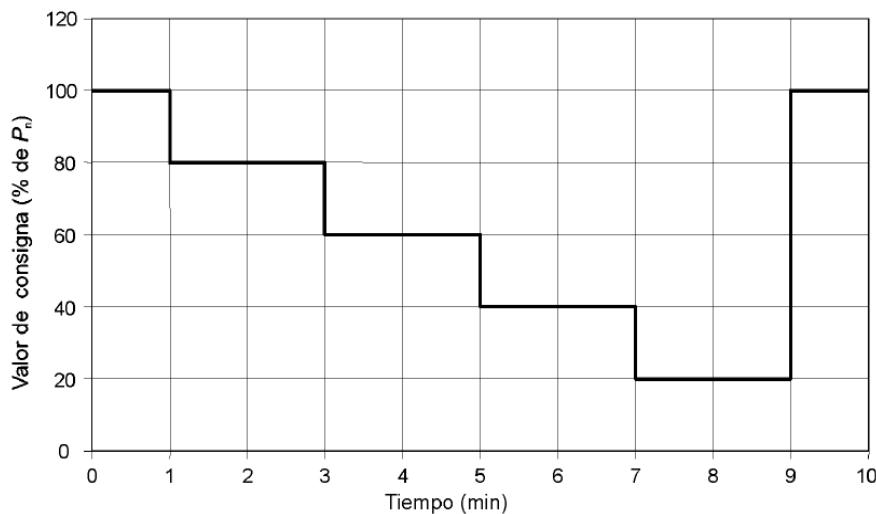
La emisión de armónicos se considera inofensiva, siempre que su duración sea de un corto periodo de tiempo. La norma no exige la especificación de los armónicos de duración breve provocados por el arranque del aerogenerador u otras operaciones de conexión.

Los valores individuales de corrientes armónicas deben especificarse como los valores de los subgrupos para las frecuencias hasta 50 veces la frecuencia fundamental de la red, y la distorsión armónica total de corriente debe especificarse como derivada de estos valores. Los armónicos deben establecerse para el aerogenerador que funciona con una potencia reactiva lo más próxima a cero.

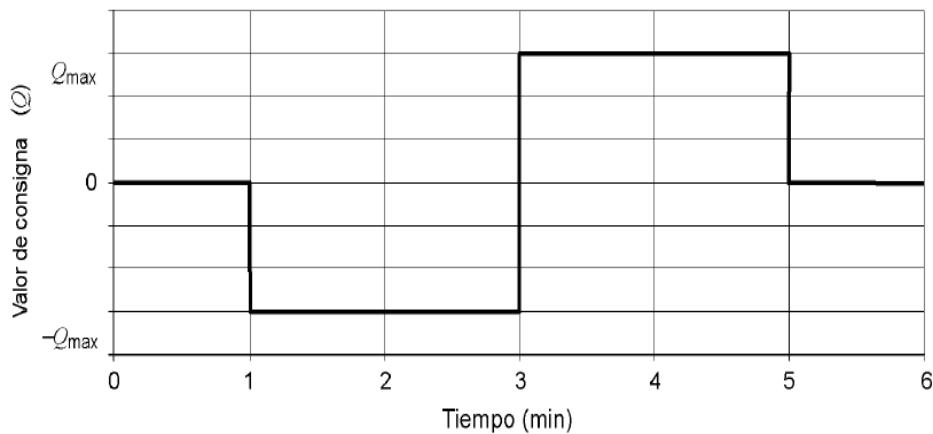
El aerogenerador caracteriza su funcionamiento en modo de control de la potencia activa en base a los resultados de ensayos presentados en forma gráfica. El gráfico debe presentar la potencia de salida activa disponible medida durante el funcionamiento a los valores ajustados desde el 100% al 20% de la potencia asignada por tramos del 20% con un funcionamiento de 2 min a cada valor, como en la figura 3.1.

El control de potencia reactiva se describe en la tabla 3.1y la gráfica 3.2. La tabla debe presentar la potencia reactiva medida a un valor de consigna de la potencia reactiva igual a 0 para un funcionamiento de 0, 10, 20,...100% de la potencia de salida. Las potencias activa y reactiva deben ser valores integrados en 1 min. El gráfico debe representar la potencia reactiva medida en el curso de una variación por tramos del valor de consigna de la potencia reactiva como se especifica en la figura 3.2. La potencia de salida, medida como valores medios en 1 min, debe corresponder alrededor del 50% de

la potencia asignada. La potencia reactiva debe corresponder a los datos integrados en tramos de 0,2 s.



**Figura 3.1:** Ajuste del valor de consigna de la potencia activa.

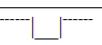
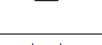
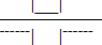
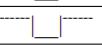


**Figura 3.2:** Ajuste del valor de consigna de la potencia reactiva.

La respuesta del aerogenerador ante las caídas de tensión especificadas en la tabla 3.1 se debe asegurar con el aerogenerador funcionando a carga parcial (entre 10% y el 30% de la potencia nominal) y a plena carga (por encima del 90% de la potencia nominal). La respuesta establecida debe incluir los resultados de 2 ensayos consecutivos de cada caso (VD1-VD6) para series temporales de potencia activa, potencia reactiva, corriente activa, corriente reactiva y de tensión en los bornes del aerogenerador poco antes de la caída de tensión y hasta que el efecto de la caída de tensión haya cesado, así como el modo de funcionamiento del aerogenerador que también debe especificarse.

El ensayo sirve para verificar la respuesta del aerogenerador a las caídas de tensión debidas a fallas en la red y para proporcionar una base para la validación de un modelo de simulación numérica del aerogenerador.

**Tabla 3.1:** Tabla ensayo huecos de tensión según norma IEC 61400-21.

Caso	Amplitud de la tensión entre fases (fracción de la tensión inmediatamente antes de que se produzca la caída)	Amplitud de la tensión de secuencia directa (fracción de la tensión inmediatamente antes de que se produzca la caída)	Duración (es)	Forma
VD1 – caída de tensión trifásica simétrica	$0.90 \pm 0.05$	$0.90 \pm 0.05$	$0.5 \pm 0.02$	
VD2 – caída de tensión trifásica simétrica	$0.50 \pm 0.05$	$0.50 \pm 0.05$	$0.5 \pm 0.02$	
VD3 – caída de tensión trifásica simétrica	$0.20 \pm 0.05$	$0.20 \pm 0.05$	$0.2 \pm 0.02$	
VD4 – caída de tensión bifásica	$0.90 \pm 0.05$	$0.95 \pm 0.05$	$0.5 \pm 0.02$	
VD5 – caída de tensión bifásica	$0.50 \pm 0.05$	$0.75 \pm 0.05$	$0.5 \pm 0.02$	
VD6 – caída de tensión bifásica	$0.20 \pm 0.05$	$0.60 \pm 0.05$	$0.2 \pm 0.02$	

NOTA 1 Una caída de tensión puede causar la parada de un aerogenerador por numerosas razones, no solamente asociadas a la transmisión eléctrica, sino debidas también a las vibraciones mecánicas o a las capacidades de baja tensión del sistema auxiliar. Por lo tanto, es necesario realizar el ensayo en el aerogenerador completo en vez de confiar solamente en los resultados del ensayo en el sistema de transmisión.

NOTA 2 El fin de VD1 y VD4 es esencialmente ensayar los aerogeneradores que no tienen capacidad de superar una caída de tensión profunda y los ensayos son generalmente aplicables como base para la validación de los modelos de simulación numérica.

La funcionalidad del sistema de protección de la red del aerogenerador será también ensayada. Deben verificarse los niveles y tiempos de desconexión reales del aerogenerador a partir de los ajustes dados para los niveles y tiempos de actuación de las protecciones de sobretensión, subtensión, sobre frecuencia y subfrecuencia del aerogenerador. El tiempo de desconexión es la duración entre el inicio de la subtensión/sobretensión o de la sobre frecuencia/subfrecuencia y la desconexión del aerogenerador.

El tiempo de reconexión después de la desconexión del aerogenerador como consecuencia de un fallo en la red debe caracterizarse por los resultados de ensayos presentados en una tabla. La tabla debe presentar el tiempo de reconexión después de un fallo de la red durante 10 segundos, 1 minuto y 10 minuto, respectivamente. El tiempo de reconexión es la duración entre el instante en que la red está disponible en los bornes del aerogenerador y el instante en que el aerogenerador comienza a producir energía.

### **3.2 Huecos de tensión.**

Dentro de la calidad de la energía, la respuesta que los aerogeneradores tienen frente a los huecos de tensión tiene gran importancia debido a los efectos perjudiciales que tiene para la estabilidad del sistema una desconexión inapropiada. A continuación se muestran dos normas que describen lo que es un hueco de tensión;

-Norma UNE-EN 50160: “Disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura entre 10 milisegundos y 1 minuto. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión.

-Norma IEEE Std 1159-1995: Disminución de la tensión o de la corriente entre un 0.1 y un 0.9 pu a la frecuencia de la red con duraciones desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto.

De hecho, en el procedimiento de verificación, validación, y certificación de los requisitos del P.O. 12.3 sobre la respuesta de las instalaciones eólicas ante huecos de tensión, documento que regula los ensayos a realizar en generadores eólicos en España, se define la profundidad del hueco como la caída de tensión por debajo del 85% de la nominal, ya que la norma IEC 61000-4-30 deja libre la elección del valor a partir del cual una perturbación se considera como hueco de tensión.

Normalmente la tensión de la red eléctrica oscila en torno a su valor nominal con variaciones comprendidas en un rango máximo del 10% de dicho valor. Un hueco es la bajada repentina de la tensión en una o más fases, seguida de un rápido restablecimiento en un corto espacio de tiempo. Si la tensión cae por debajo del 1%, entonces se considerará una interrupción breve (si dura menos de 3 minutos). Si está por encima del 90%, entonces se considerará que la tensión se encuentra en su rango normal de funcionamiento aunque, como ya se ha indicado, depende de la norma en uso.

Haciendo una aproximación, y apoyándonos en las definiciones del apartado anterior, se puede caracterizar un hueco de tensión mediante su tensión residual o profundidad p y la duración  $\Delta t$ .

Los huecos de tensión en redes trifásicas pueden ser divididos en dos grandes categorías:

- Huecos simétricos, donde las tensiones de las tres fases caen en la misma proporción.
- Huecos asimétricos, donde las caídas de las tres fases no son iguales. Pueden ser monofásicos o bifásicos.

Normalmente la mayor parte de los huecos que aparecen en la red son monofásicos, provocados por un cortocircuito entre una fase y tierra. Las faltas bifásicas son menos comunes, y consisten en un cortocircuito entre dos fases. Los huecos trifásicos pueden producirse cuando circulan grandes corrientes por las fases de una línea.

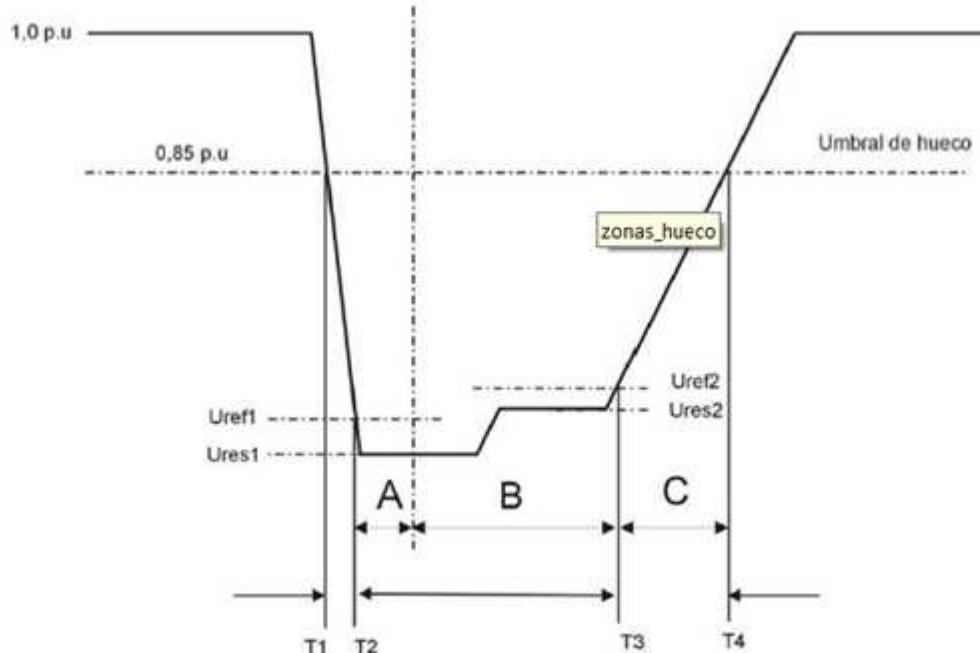


Figura 3.3: Parámetros característicos de un hueco de tensión.

### 3.3 ENSAYO EN AEROGENERADORES

En este apartado se describen las condiciones y criterios de validez del ensayo en campo así como los procedimientos de operación habitualmente seguidos.

Nuestra herramienta informática ha sido diseñada en base a los equipos MEGHA y QuEST LAB basados en divisor inductivo para generar huecos de tensión. El generador de huecos se compone básicamente de una impedancia serie que tiene como función limitar la corriente de cortocircuito aportada por la red eléctrica en la que se realiza el ensayo, y de una combinación de reactancias y/o transformadores en la rama paralelo conectada a tierra. Mediante la bobina serie es posible regular la potencia de cortocircuito en el punto de ensayo, para que esta sea igual o superior a 5 veces la potencia registrada del aerogenerador a ensayar como indica, por ejemplo, la normativa española .

El laboratorio responsable de realizar las pruebas deberá confirmar que durante los ensayos no se ha buscado un instante concreto de ocurrencia y despeje del cortocircuito, ni tampoco un factor de potencia tal que fueren especialmente favorables a la permanencia del aerogenerador acoplado durante el hueco de tensión.

#### 3.3.1 P.O. 12.3 (Caso español)

El procedimiento de operación establece los requisitos que han de cumplir las distintas instalaciones de producción en régimen especial a efectos de garantizar la continuidad de suministro frente a huecos de tensión. Este procedimiento se aplica a los nuevos parques eólicos que se conecten al sistema eléctrico y cuya fecha de inscripción definitiva en el Registro administrativo de instalaciones de producción de régimen

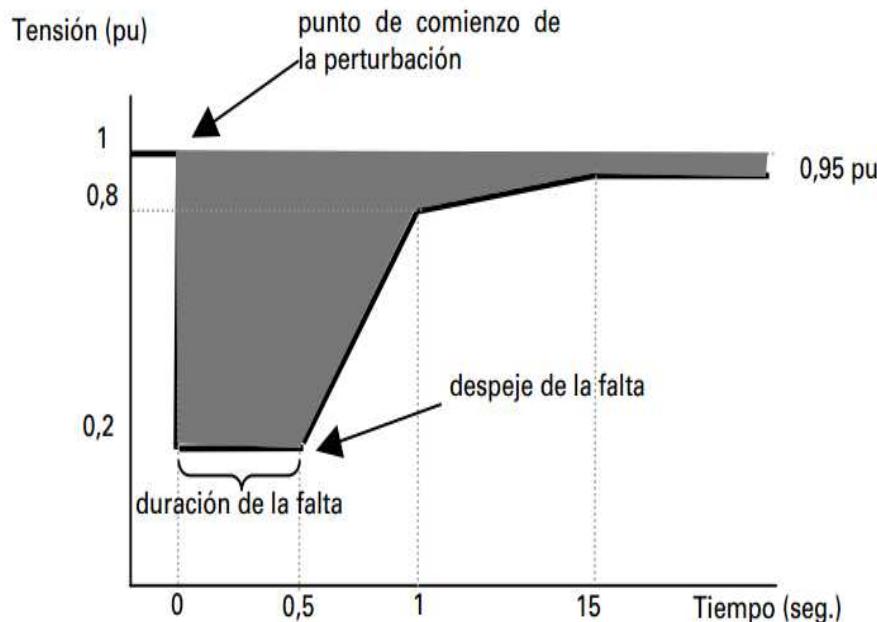
especial, dependiente del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, sea posterior a 1 de enero de 2007. En el caso de instalaciones existente que por su configuración técnica les fuese imposible acreditar el cumplimiento de los requerimientos mínimos previstos en este procedimiento de operación, sus titulares deberán presentar ante el Operador del Sistema, en el plazo transitorio que les corresponda, una memoria justificativa de dicha imposibilidad técnica, impidiéndose con ello el devengo del incentivo económico.

Los tiempos de recuperación del sistema eléctrico representado en la figura 3.4, se verifican, con carácter general, para una producción de origen eólico inferior al 5% de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión. En el caso de aumentarse esta limitación de producción eólica, la curva de la figura deberá modificarse de tal forma que las instalaciones de generación eólica soporten huecos de tensión de mayor profundidad. Tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia reactiva por parte de la instalación, se admiten consumos puntuales de potencia reactiva durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma y ello, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

Durante un periodo de 150 ms desde que se produce la falta, el consumo neto de potencia reactiva de la instalación, en cada ciclo (20 ms), no deberá ser superior al 60% de su potencia nominal registrada. Durante los primeros 150 ms desde que se despeja la falta, el consumo neto de energía reactiva no deberá ser superior al 60 % de su potencia nominal y el consumo neto de intensidad reactiva de la instalación, en cada ciclo, no deberá ser superior a 1,5 veces la intensidad correspondiente a su potencia nominal registrada.

De forma paralela, tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta, como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, no podrá existir en el punto de conexión a la red, consumo de potencia activa por parte de la instalación. En este caso se admite también la existencia de consumos puntuales de potencia activa durante los 150 ms inmediatamente posteriores al inicio de la falta y los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la misma. Además se permiten consumos de potencia activa durante el resto de la falta, siempre que no sean superiores al 10% de su potencia nominal registrada. Tanto durante el periodo de falta como durante el periodo de recuperación de tensión posterior al despeje de la misma, la instalación deberá aportar al sistema eléctrico la máxima intensidad posible. Esta aportación de intensidad por parte de la instalación al sistema eléctrico se efectuará de forma que el punto de funcionamiento de la instalación se localice dentro del área sombreada en la figura 2, antes de transcurridos 150 ms desde el inicio de la falta o desde el instante de despeje de la falta. Así, para tensiones inferiores a 0,85 pu, en el punto de conexión a red, la instalación deberá generar potencia reactiva, mientras que para tensiones comprendidas entre 0,85 pu y el valor de la tensión mínima admisible para la operación normal del sistema eléctrico, la instalación no deberá consumir potencia reactiva. Para valores de

tensión superiores a la tensión mínima admisible en operación normal aplicará lo establecido en los procedimientos de operación para dicha operación normal.



*Figura 3.4. Curva tensión-tiempo que define el área del hueco de tensión.*

En resumen voy a explicar brevemente los puntos fundamentales del P.O. 12.3:

- (1) Garantía de continuidad de suministro: no se debe producir la desconexión del aerogenerador durante la aplicación del hueco de tensión en tres ensayos consecutivos correspondientes a la misma categoría. En el caso de que se produzca al menos una desconexión en esta secuencia de ensayos (3 primeros ensayos consecutivos), se considerará válida la condición de continuidad de suministro sólo cuando en los cuatro siguientes ensayos, correspondientes a la misma categoría, no se produce desconexión del aerogenerador. En el caso que se produzca en esta última serie de ensayos alguna desconexión, se dará válido el ensayo.
- (2) Punto de operación: para cada categoría de ensayo es condición necesaria que la potencia activa y reactiva registradas previa a la realización del hueco de tensión esté dentro del intervalo que define carga parcial y plena carga.
- (3) Nivel de tensión residual y tiempo durante el ensayo: para cada una de las categorías, los requisitos a cumplir por los ensayos, son diferentes en función de la potencia de cortocircuito existente en punto de ensayo. Para el caso en el que la potencia de cortocircuito en el punto de ensayo sea igual o superior a 5 veces la potencia registrada del aerogenerador a ensayar, la evaluación de la duración y profundidad del hueco se ha de realizar mediante ensayos de vacío, mientras que para el caso en el que este valor sea inferior a 5, la evaluación se ha de realizar mediante ensayos de carga.

- (4) Condiciones de intercambio de potencia y energía en el punto de ensayo: las medidas de tensión y corriente necesarias para el cálculo posterior de potencia y energía (activa y reactiva) según se indica en el P.O. 12.3, se registrará en el punto de ensayo.

En el caso de que los aerogeneradores utilizados en un parque sean capaces de cumplir lo establecido en el P.O. 12.3 para huecos bifásicos, con las condiciones de ensayo definidas en este apartado, no será necesario realizar la simulación del cortocircuito bifásico en el punto de conexión a red. Asimismo para los aerogeneradores utilizados en un parque eólico que sean capaces de cumplir lo establecido en el P.O. 12.3 (con consumos de potencia reactiva más reducidos) con las condiciones de ensayo definidas en este apartado, no será necesario realizar la simulación del cortocircuito trifásico en el punto de conexión a red.

### **3.3.2 Grid Codes internacionales.**

Los equipos de ensayos que dispone 4FORES son capaces de llevar a cabo los ensayos requeridos por un gran número de normativas internacionales.

Los requisitos de conexión a red o Grid Codes y los documentos relacionados varían entre los distintos sistemas de eléctricos y generadores de red. Sin embargo, para simplificar, los requisitos típicos que se vienen exigiendo a los generadores pueden agruparse de la siguiente manera:

- Tolerancia, la gama de condiciones en el sistema eléctrico para la que los parques eólicos deben seguir funcionando.
- Control de potencia reactiva, a menudo esto incluye los requisitos para contribuir al control de tensión de la red.
- Control de potencia activa, a menudo esto incluye los requisitos para contribuir al control de la frecuencia de la red.
- Dispositivos de protección.
- Calidad de la energía.

Es importante señalar que estos requisitos se especifican a menudo en el punto de acoplamiento común (PCC) entre el parque eólico y la red eléctrica. En este caso los requisitos se encuentran a nivel de parques eólicos y los aerogeneradores pueden ser adaptados para cumplir con estos requisitos. También es posible que algunos de los requisitos que deben cumplir requieran la instalación de algún equipo adicional, como por ejemplo los dispositivos FACTS y en esos casos será necesario verificar y validar el comportamiento del conjunto de la instalación. En el P.O. 12.3 se exige que la instalación generadora sea capaz de soportar huecos de tensión. El nuevo P.O. 12.2, en su versión borrador en el momento de escribir este documento y en sintonía con los

Grid Codes internacionales ya en vigor, persigue que las energías renovables sean capaces de aportar otros servicios que ofrece la generación convencional como:

Soportar determinadas sobretensiones y posibles desfases que pueden aparecer en la red, control de potencia activa y reactiva, que sean capaces de mantenerse conectados a red cuando ocurre una variación de frecuencia además de otros criterios de calidad de red (armónicos, desequilibrios, flicker, etc.), además de cumplir de forma casi inmediata los condicionantes técnicos que impone el P.O. 12.3, de poder soportar los huecos de tensión sin desconectar la instalación, contribuyendo a que no se produzca la desestabilización del sistema eléctrico.

En definitiva el cumplimiento de los Grid Codes son la base para que el sector renovable siga creciendo como alternativa a las energías convencionales.

En la siguiente tabla se observa un resumen de los principales requerimientos de los Grid Codes internacionales más importantes para diferentes perturbaciones.

*Tabla 3.2. Características de los Grid Codes más comunes.*

Grid Code	Sobretensión	Desfase	Huecos	Frecuencia
España PO12.2	1.15 p.u. @ 1000 ms 1.20 p.u. @ 50 ms	30° Inst	0.00 p.u. @ 150 ms 0.20 p.u. @ 500 ms 0.85 p.u. @ 1000 ms	47.5-50 Hz @ 3 s 50-51.5 Hz @ Continuo
NER	1.1 p.u. @ 700 s 1.2 p.u. @ 400 ms 1.3 p.u. @ 60 ms	N/A	0.00 p.u. @ 100 ms 0.15 p.u. @ 150 ms 0.80 p.u. @ 1000 ms	47-49.5 Hz @ 60s 49.5-50 Hz @Continuo 50-50.5 Hz @ Continuo 50.5-52 Hz @ 60 s
E.ON Grid Code	1.1 p.u. 1.2 p.u. 1.3 p.u.	N/A	0.00 p.u. @ 400 ms 0.25 p.u. @ 650 ms 0.65 p.u. @ 1500 ms 0.81 p.u. @ 2500 ms 0.90 p.u. @ 3000 ms	47.5-50 Hz @ Continuo 50-51.5 Hz @ Continuo
National Grid Code	N/A	N/A	0.00 p.u. @ 140 ms 0.30 p.u. @ 400 ms 0.50 p.u. @ 800 ms 0.65 p.u. @ 1000 ms 0.80 p.u. @ 1200 ms	47-47.5 Hz @ 20 s 47.5-52 Hz @ Continuo

## **4. EQUIPOS DE ENSAYO**

En este apartado se describen los equipos de ensayo MEGHA y QuEST LAB, detallando los elementos que lo componen, las características de ensayos que son capaces de realizar y los procedimientos de ensayo que deben seguirse.

### **4.1 MEGHA**

MEGHA es un generador de huecos de tensión, cuya invención se llevó a cabo para la generación de huecos de tensión de hasta el 100% de profundidad, con pasos de profundidad de hueco ajustables y con capacidad para conectarse en un parque eólico o sistema de generación de energía eléctrica entre la línea de evacuación de energía eléctrica producida por los generadores de la instalación eléctrica y el sistema de generación de energía eléctrica o aerogenerador bajo ensayo, donde el equipo generador de huecos de tensión controla y regula la potencia de cortocircuito que detecta la máquina generadora de energía o aerogenerador a ensayar en cualquier tipo de redes hasta 20kV y potencias superiores comprendidas entre 100 kW y 5 MVA.

Este equipo de ensayo permite seleccionar la profundidad de hueco, así como su duración para adecuarse a cada tipo de falta requerida a producir en la red eléctrica según la norma de referencia a verificar. El equipo generador de huecos de tensión dispone de un divisor de impedancias formado por una rama en serie seguida de otra en paralelo, constituidas respectivamente por los siguientes elementos:

-Bancos trifásicos de impedancias, una por cada fase, colocadas en serie en la línea de evacuación del sistema de generación eléctrica y previas a la rama paralelo, cuya función es limitar la corriente de cortocircuito aportada por la red eléctrica en la que se realiza el ensayo de manera que controlan y regulan la potencia de cortocircuito en el generador y que no haya perturbaciones en la red.

-Transformadores de tomas variables (o transformadores de tomas variables en paralelo), en paralelo cuando así se requiera con un juego de impedancias, con posibilidad de conexión a tierra, situado tras el banco de impedancias serie y en paralelo con el aerogenerador a ensayar. Este transformador dispone de distintas tomas ajustables en el primario y secundario que permiten regular la relación de transformación del mismo y controlar la profundidad del hueco actuando como adaptador de impedancias.

-Bancos de impedancias trifásicas, una por cada fase, variables o fijas, pudiendo éstas conectar la puesta a tierra. Estas impedancias junto con la regulación del transformador permiten realizar el hueco de tensión de la profundidad requerida.

Además, el MEGHA dispone de elementos de control necesarios para realizar un hueco de tensión en forma automatizada:

-Equipo para la selección de la toma del transformador más adecuada, con el propósito de realizar el hueco de la profundidad deseada.

- Interruptor by-pass del banco de impedancias serie para la conexión directa de la red con el sistema de generación de energía eléctrica al que está conectado el equipo de ensayos.
- Interruptor de conexión de la rama en paralelo y energización del primario del transformador.
- Interruptor de accionamiento que conecta el secundario del transformador con los bancos de impedancias dispuestos en el secundario del mismo.
- Interruptor de selección de impedancias. Este interruptor selecciona el tipo de falta requerido, conectando las impedancias de aquellas fases a las que se les vaya a provocar un hueco de tensión.
- Interruptores de acoplamiento y desacoplamiento, situados en cabecera y salida del equipo generador de huecos de tensión. Permiten aislar completamente el equipo generador de huecos de tensión del resto de la instalación.
- Interruptor de puesta a tierra de los bancos de impedancias dispuestos en la rama paralelo.
- Equipo de control que acciona el cierre y apertura de los interruptores según la secuencia programada para la generación de huecos.

Además, el equipo dispone de medidas de protección propias para el transformador que lo desconectan ante una falla interna en los devanados del transformador. El equipo es capaz de generar huecos de tensión trifásicos, bifásicos y monofásicos de entre 0% y 100% de profundidad y de duración deseada conectado directamente entre los bornes del sistema de generación eléctrica y el sistema colector de energía eléctrica. Permite realizar el ensayo directamente en la ubicación de explotación del sistema de generación de energía eléctrica sin perturbar el funcionamiento normal del resto de elementos asociados a éste.

En la figura 3 se muestra un esquema eléctrico de los elementos que componen el equipo generador de huecos de tensión. El equipo generador de huecos de tensión presenta un interruptor (1) de acoplamiento desde el sistema (13) colector, que recibe la energía producida por el sistema (14) generador, que en este ejemplo de realización preferente es un aerogenerador. En serie con el interruptor (1) de acoplamiento desde el sistema (13) colector, el equipo generador de huecos de tensión presenta uno o varios interruptores (2) by-pass en paralelo con impedancias (3) variables o fijas, de manera que cuando los interruptores (2) by-pass , el interruptor (1) de acoplamiento y un interruptor (4) de desacoplamiento están cerrados, permiten la conexión directa entre el sistema (13) colector y el sistema (14) generador de energía eléctrica o aerogenerador del mismo modo que si no estuviese intercalado el equipo generador de huecos de tensión.

Una vez abierto el interruptor (2) by-pass se sigue conectando el sistema (14) generador de energía eléctrica con el sistema (13) colector pero a través de las impedancias (3) variables o fijas, para no perturbar el correcto funcionamiento del resto del parque eólico durante la realización del ensayo.

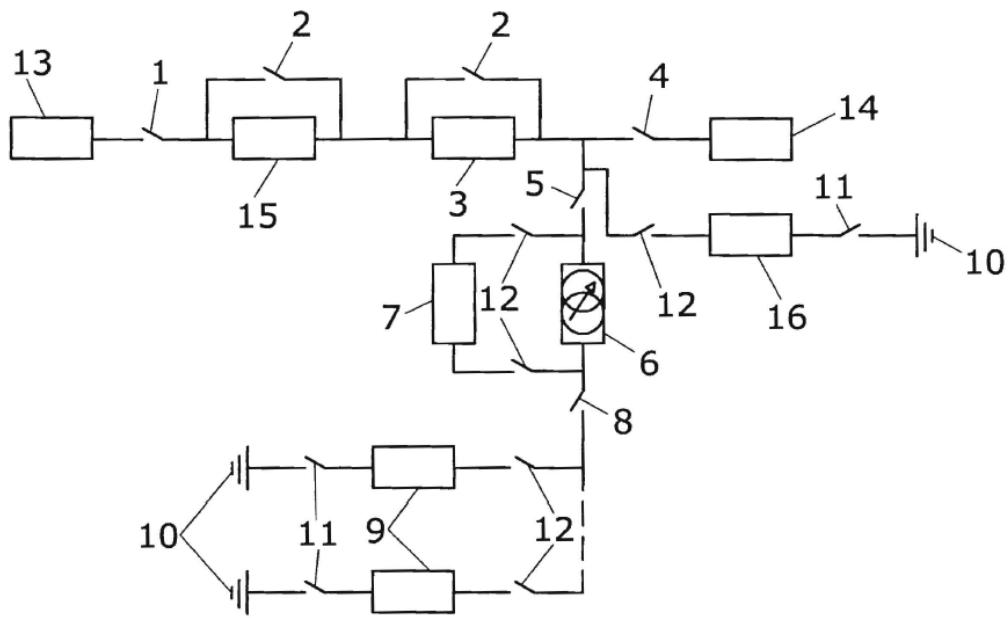
Con las impedancias (3) variables o fijas conectadas se produce el cierre del interruptor (5) de conexión de la rama en paralelo energizando el devanado primario de un transformador (6) o varios transformadores en paralelo dispuestos en esta rama.

El transformador (6) actúa de regulador de 1% a 100% de las impedancias (9) dispuestas en el secundario del transformador (6), con interruptores (12) de selección de impedancias según se pretenda simular un hueco de tensión trifásico, bifásico o bien monofásico para lo que se dispone de varias tomas intermedias de estas impedancias, así como impedancias (16) con tomas intermedias colocadas antes del primario del transformador.

Otras impedancias (7) situadas en paralelo con el transformador permiten disminuir la impedancia equivalente del transformador en paralelo con éstas, según sea la profundidad de hueco requerida. Con el transformador (6) trabajando en vacío se procede a cerrar el interruptor (8) de accionamiento que conecta el secundario de este transformador a los bancos de impedancias (9) del secundario del transformador (6), variables o fijas, pudiéndose éstas conectar a la puesta (10) a tierra mediante un interruptor (11). Mediante la temporización del cierre y apertura de este interruptor (8) de accionamiento se consigue la duración de hueco requerida. Así el hueco de tensión adquiere la profundidad deseada seleccionando previo al ensayo, el banco de impedancias (9) del secundario del transformador (6) y la relación de transformación o toma del transformador (6) apropiada.

Un banco de impedancias (15) de salto de fase variables o fijas, en la línea de evacuación del sistema (14) generador de energía eléctrica, se conectan antes o después de generar el hueco de tensión con la adecuada sincronización. Lo que permite ensayar saltos de fase en el sistema (14) generador de energía eléctrica al modificar el factor de calidad X/R general que varía respecto al del comienzo del ensayo y, por tanto, provocar un salto de fase controlable.

La línea discontinua de la figura 1 entre las dos ramas de impedancias (9) del secundario del transformador (6), variables o fijas, indica la posibilidad de añadir otras ramas en paralelo, con los mismos tipos de elementos que las mencionadas anteriormente, para la generación de distintos tipos de huecos de tensión.



*Figura 4.1: Esquema MEGHA.*

## 4.2 QuEST LAB.

QuEST LAB se trata de un equipo generador de perturbaciones eléctricas en la red conectada a un sistema de generación de energía eléctrica, como por ejemplo un aerogenerador o planta solar, para ensayar la respuesta de los generadores ante perturbaciones en la red, entendiendo perturbaciones como huecos de tensión, sobretensiones y saltos de fase. El equipo generador de perturbaciones (huecos de tensión de hasta 100% de profundidad, sobretensiones de hasta 135%) está diseñado para conectarse en un sistema de generación de energía eléctrica, más concretamente entre la línea de evacuación y el sistema de generación eléctrica, como un aerogenerador.

Para resolver el problema existente en la actualidad en cuanto a la simulación o ensayo de perturbaciones eléctricas en instalaciones de generación eléctrica se ha ideado el equipo generador de perturbaciones eléctricas, el cual se compone de un transformador trifásico de tomas variables conectado en serie entre el sistema colector y el generador, encargándose este transformador de realizar sobretensiones, huecos de tensión y saltos de fase, mediante la commutación de una rama de by-pass con una impedancia con la rama que contiene el transformador, disponiendo asimismo en paralelo de una batería de condensadores para realizar sobretensiones con ayuda de una impedancia y resistencias serie.

Este equipo está montado en una plataforma de camión para dotarlo de un mejor transporte al lugar de las diferentes centrales de generación de energía. El límite de potencia previsto del equipo a ensayar es de 10 MW, pudiendo este elevarse redimensionando los equipos de que consta (transformador, impedancias,

rectificador,...). El esquema consta de un transformador trifásico en paralelo con unas impedancias de tomas variables (resistencias o inductancias), para limitar la corriente mientras el transformador está cortocircuitado. Este transformador dispone de tomas variables, lo cual permite realizar ensayos de huecos de tensión y sobretensiones a diferentes niveles de tensión. Por otro lado dispone, conectado en paralelo con el equipo a ensayar, de una batería de condensadores que permite la realización de sobretensiones y saltos de fase.

Una ventaja añadida es que para la realización de los ensayos de sobretensión, desfase y subtensión utiliza interruptores electromecánicos de vacío, más rápidos que los de SF6 convencionales utilizados con lo que se limita el tiempo que el transformador está sometido a sobrecorrientes y abarata el coste del dispositivo comparado con el uso de interruptores electrónicos. Otra de las ventajas es la no utilización de electrónica de potencia ya que de este modo, el dispositivo dispone de una mayor fiabilidad ante fallos debido a que los equipos son muy susceptible de fallo a las elevadas tensiones y potencias que presentan durante el ensayo, sin dejarnos la gran ventaja que supone la posibilidad de ir montado sobre camión, dotándole de gran movilidad para propiciar las pruebas de campo.

A continuación se muestra una explicación del montaje del QuEST LAB apoyándonos en la figura del final. El equipo generador de perturbaciones eléctricas objeto de la presente invención, comprende básicamente, como puede apreciarse en la figura 4, los siguientes elementos:

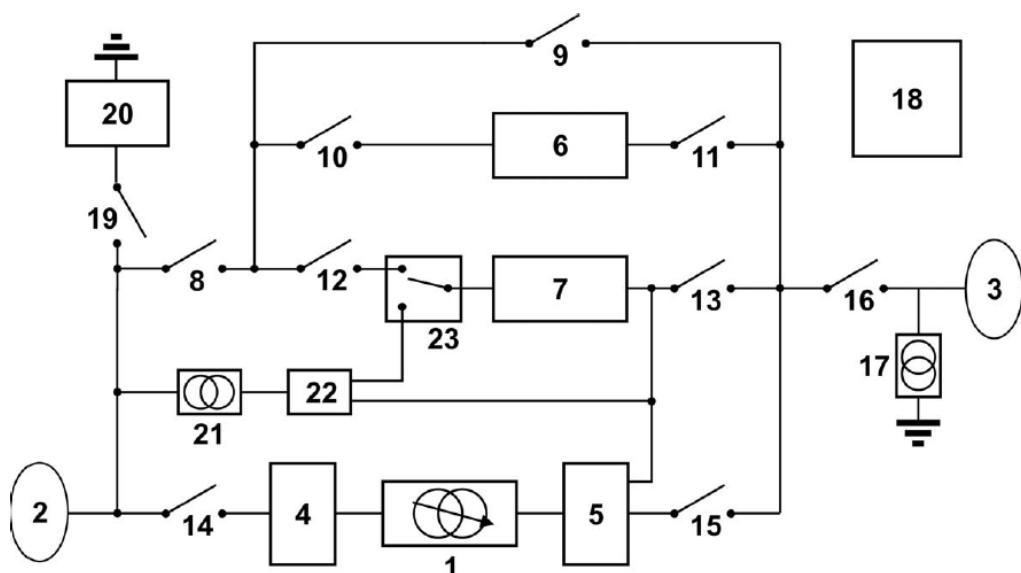
- Un transformador (1) trifásico de tomas variables conectado en serie entre el sistema generador (2) de energía eléctrica y la red de energía (3) conectado a sendos armarios de conexión (4,5) que permiten realizar distintos tipos de conexión del dispositivo y conectar las fases necesarias.
- Un banco trifásico de impedancias (6) con distintas tomas, un banco trifásico de resistencias (7) con distintas tomas, un transformador reductor (21) y un rectificador (22) colocado en paralelo entre sistema generador (2) y la red de energía (3), y en serie con las resistencias(7), unos interruptores monofásicos de vacío (8) y el de resistencias (7) para su conexión por separado o combinados con el transformador (1) y asimismo en serie entre el sistema generador (2) y la red de energía (3).
- Un interruptor by-pass (9) del banco de impedancias trifásicas para conexión directa de la red de energía (3) con el sistema generador (2), unos interruptores seccionadores (10) y (11) del banco trifásico de impedancias (6) para poder operar las tomas de las impedancias de manera segura, un interruptor automático (12) y un interruptor seccionador (13) del banco trifásico de resistencias (7) utilizado para operar con seguridad las tomas de las resistencias.
- Un armario de conexión (23) entre el rectificador (22) y el interruptor automático (12), unos interruptores automáticos (14) y (15) de conexión del transformador (1) para operar las tomas del transformador de manera segura, y poder realizar los diferentes

tipos de ensayos, un interruptor de acoplamiento/desacoplamiento (16) situado en la salida del equipo de ensayos a la red de energía (3), un transformador de servicios auxiliares (17) y los oportunos equipos de control, medida y comunicaciones (18), alimentados desde el transformador de servicios auxiliares (17).

-Una batería de condensadores (20) en la entrada del sistema generador (2), interruptor de conexión (19) de dicha batería de condensadores (20). El armario de conexión (4) del transformador (1) al sistema generador (2) y el armario de conexión (5) del transformador (1) al sistema colector (3) permiten la conexión de una, dos o tres fases para realizar ensayos monofásicos, bifásicos o trifásicos, y su conexión invertida.

El equipo dispone de medidas de protección para el transformador que lo desconectan ante una falla interna en los devanados del transformador (1).

El equipo QuEST LAB permite generar perturbaciones trifásicas, bifásicas y monofásicas con la tensión y duración deseada, como huecos de tensión de hasta el 100% de profundidad, sobretensiones de hasta 173% y saltos de fase de hasta 35 grados. Estos ensayos pueden tener una duración variable desde 50 ms en adelante y permite reproducir ensayos en niveles de tensión a partir de 500V, conectándose directamente a los bornes del sistema de generación eléctrica.



*Figura 4.2. Esquema QuEST LAB.*

### 4.3 Sistemas de control

Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) son aplicaciones de software, diseñadas con la finalidad de controlar y supervisar procesos a distancia. En el caso de nuestro proyecto el sistema SCADA nos permite adecuar los ajustes del divisor al hueco a ensayar y recibir los resultados de las corrientes, huecos, etc. obtenidos durante el ensayo a distancia. Se trata de una aplicación de software, especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo y controlando el ensayo de forma

automática desde un ordenador. Las tareas de supervisión y control generalmente están más relacionadas con el software SCADA, en él, el operador puede visualizar en la pantalla del computador de cada una de las estaciones remotas que conforman el sistema, los estados de ésta, las situaciones de alarma y tomar acciones físicas sobre algún equipo lejano, la comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de equipo la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos.

Estos sistemas actúan sobre los dispositivos instalados en el equipo de ensayos, como son el PLC, autómatas, sensores, actuadores, registradores, etc. Además permiten controlar el proceso desde una estación remota, para ello el software brinda una interfaz gráfica que muestra el comportamiento del proceso en tiempo real.

Un software SCADA debe ser capaz de ofrecer al sistema:

- Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- Generación de datos históricos de las señales de planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- Ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o modificar las tareas asociadas al autómata, bajo ciertas condiciones.
- Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

Existen diversos tipos de sistemas SCADA dependiendo del fabricante y sobre todo de la finalidad con que se va a hacer uso del sistema, por ello antes de decidir cuál es el más adecuado hay que tener presente si cumple o no ciertos requisitos básicos:

- Todo sistema debe tener arquitectura abierta, es decir, debe permitir su crecimiento y expansión, así como deben poder adecuarse a las necesidades futuras del proceso y de la planta.
- La programación e instalación no debe presentar mayor dificultad, debe contar con interfaces gráficas que muestren un esquema básico y real del proceso.
- Deben permitir la adquisición de datos de todo equipo, así como la comunicación a nivel interno y externo (redes locales y de gestión).
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware, y fáciles de utilizar, con interfaces amigables para el usuario.

Los sistemas SCADA necesitan comunicarse vía red, puertos GPIB, telefónica o satélite, es necesario contar con computadoras remotas que realicen el envío de datos hacia una computadora central, esta a su vez será parte de un centro de control y gestión de información.

Para realizar el intercambio de datos entre los dispositivos de campo y la estación central de control y gestión, se requiere un medio de comunicación, existen diversos medios que pueden ser cableados (cable coaxial, fibra óptica, cable telefónico) o no cableados (microondas, ondas de radio, comunicación satelital).

El sistema SCADA del MEGHA está conformado por:

-Selección de ensayo: este procedimiento es el utilizado para la selección de los equipos involucrados en la realización de un hueco de tensión determinado. Para poder empezar con la selección del ensayo necesitamos que se muestre el botón “ENSAYO”, lo cual solo sucederá si los componentes (interruptor y seccionador) de las diferentes celdas se encuentran en “MODO ENSAYO”, mostrado en la imagen 4.3. Mediante esta selección de ensayo elegiremos los diferentes ajustes del MEGHA que queremos ensayar.

-Realización de ajustes: se acciona el botón “AJUSTES”, luego para proseguir con el procedimiento de realización de ajuste, es necesario poner, o estar ya, en “MODO SEGURO”, se realizan los ajustes necesarios, a continuación podemos accionar el botón “FIN CAMBIO AJUSTES”, con los que la aplicación nos informara de que para salir del método de realizar ajustes necesitamos volver a “MODO ENSAYO, o “PARO AJUSTES”, con lo que simplemente se detendrá la posibilidad de realizar ajustes.

-Desconexión del MEGHA: se acciona el botón “DESCONECTAR”, tras lo cual aparecen dos nuevos botones “CANCELAR” y “CONFIRMAR DESCONECTAR”, accionando el primero, simplemente se para el proceso de desconexión y accionando el segundo, se abren los interruptores de las celdas 1,2 y 6, dejando el camión desconectado tanto de la red como del generador, al final se debe accionar “CANCELAR”. Para dar por terminado el proceso de desconexión.

-Colocación del MEGHA en modo de generación: se acciona el botón “GENERAR” cuando el interruptor de la celda 6 se encuentre abierto, también se cierra el interruptor de la celda 6, dejando el camión conectado al generador y apareciendo el botón “PARO GENERAR” y para salir del proceso de conexión se acciona “PARO GENERAR”.

-Lanzamiento de trigger al registrador: al activar el botón “TRIGGER” se envía una señal al registrador que produce la generación de un archivo durante el ensayo, capturando los datos en un instante determinado, siempre y cuando las conexiones de los equipos de medida sean las correctas.

-Situación de emergencia: en caso de emergencia se acciona lo antes posible el botón “EMERGENCIA” y seguidamente se acciona “CONFIRMAR EMERGENCIA”. Tras esto los interruptores de las celdas 1 y 6 se abrirán, dejando de esta forma al MEGHA sin tensión. En el caso de accionamiento accidental accionar el botón de “CANCELAR” para anular el proceso.

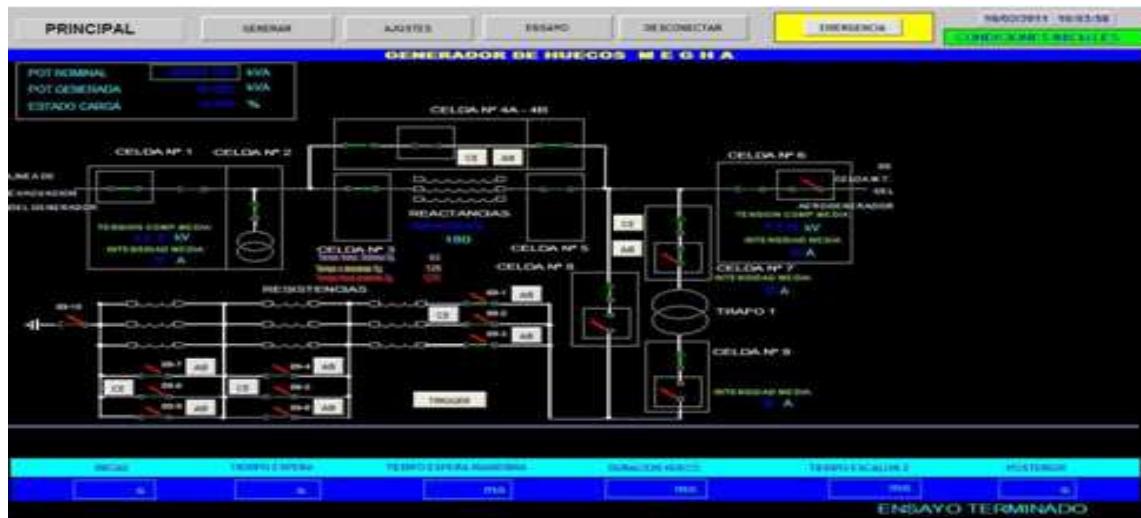


Figura 4.3: Pantalla SCADA del MEGHA

## 5. PROCEDIMIENTO AJUSTE DE ENSAYO.

La aplicación desarrollada en este proyecto es una herramienta diseñada para simplificar el ensayo de huecos de tensión en campo. Permite calcular con ella los ajustes necesarios para obtener los huecos de tensión o sobretensión deseados por el cliente de la instalación de una forma mucho más rápida a lo que se viene realizando actualmente.

La herramienta ha sido desarrollando en la hoja de cálculo en Microsoft Excel. Se ha decidido utilizar una hoja de cálculo debido al extenso uso que tiene ya que es la hoja de cálculo más extendida del mercado, y porque sus características técnicas permiten la programación de macros con un lenguaje de alto nivel con capacidades idénticas a paquetes de programación de alto nivel como Visual Basic, del cual hereda la mayoría de características técnicas. Excel trabaja con VBA (Visual Basic for Applications), lenguaje de macros de Microsoft. Se trata de la aplicación del lenguaje de programación Visual Basic 5.0 o 6.0 para Microsoft office. Permite programar cualquier cosa que se podría hacer en Visual Basic, permitiendo añadir nuevas funciones que no vienen incluidas en estos programas.

Este lenguaje se basa en: generar funciones e indicar cuándo se quiere que se ejecuten.

Un ejemplo implementado en este proyecto en Visual Basic sería:

```
Function Convert_Decimal(Degree_Deg As String) As Double
    ' Declaración de las variables
    Dim degrees As Double
    Dim minutes As Double
    Dim seconds As Double
    ' Asignar a los grados el valor delante de "°"
    degrees = Val(Left(Degree_Deg, InStr(1, Degree_Deg, "°") - 1))
    ' Asignar a los minutos el valor entre "°" y ":". Dividirlo por 60 para pasar a grados.
    minutes = Val(Mid(Degree_Deg, InStr(1, Degree_Deg, "°") + 2, _
        InStr(1, Degree_Deg, ":") - InStr(1, Degree_Deg, "°") - 2)) / 60
    ' Asignar a los segundos el valor que va después de ":". Dividirlo por 3600 para pasar a grados.
    seconds = Val(Mid(Degree_Deg, InStr(1, Degree_Deg, ":") + 2, Len(Degree_Deg) - InStr(1, Degree_Deg, ":") - 2)) / 3600
    ' Sumar los tres valores para obtener el número decimal total
    Convert_Decimal = degrees + minutes + seconds
End Function
```

Para indicar que estamos generando una función en Visual Basic debe ponerse el comando Sub o Function. Generalmente se usa Sub, excepto cuando la función debe devolver un valor que entonces se usa Function.

Un ejemplo también implementado en este proyecto seria:

```
Sub exportar_excel(query As String)

'Declaración de variables
Dim appExcel As Object
Dim wb As Object
Set appExcel = CreateObject("Excel.Application") 'Indicamos que cree un documento en excel
Set wb = appExcel.Workbooks.Add

Dim rst As Dao.Recordset 'Para indicar como cogeremos e indicaremos los datos de la tabla de la bbdd
Dim ws As Workspace
Dim db As Database

appExcel.Visible = True 'Que se muestre el documento en excel

Dim cont As Integer
cont = 2

'Introducimos los datos que queremos en la hoja de Excel

Set ws = DBEngine.Workspaces(0)

Set db = ws.OpenDatabase(Application.CurrentDb.Name) 'Abrir la bbdd para coger información
Set rst = db.OpenRecordset(query) 'Cogemos los datos indicados en la consulta

' Aquí iría la función indicando que queremos hacer con los datos que hemos cogido de la bbdd
' y que se mostrarán en el excel

End Sub
```

En VBA se ha generado prácticamente todo el código de la aplicación realizada, siendo la función principal exportar a Excel los datos introducidos en los formularios de la aplicación para su posterior procesado en la hoja Excel.

Para llevar a cabo el calculo de ajustes la aplicación requiere la introducción por parte del usuario de los parámetros característicos de la red incluido el transformador de subestación y del aerogenerador a ensayar, así como los valores pre-seleccionados para las diferentes inductancias tanto del MEGHA, como del QuEST LAB. Una vez introducidos estos datos se obtiene el resultado esperado del ensayo en cuanto a la tensión residual obtenida en el ensayo de hueco de tensión o sobretensión, las diferentes corrientes que recorren el divisor inductivo, y advirtiendo al usuario de si el tiempo de ensayo requerido es inferior a los máximo admisibles por los distintos elementos del equipo.

Debido a que el programa utiliza macros para ejecutar diversos cálculos, es necesario permitir que la aplicación tenga acceso a ellos. Una macro consiste en una serie de comandos y funciones que se almacenan conjuntamente con una hoja de cálculo y cuya

función es la ejecución de una serie automatizada de operaciones y cálculos partiendo de la información contenida en la hoja.

A continuación, para explicar y mostrar el aspecto que tiene la aplicación, se realiza un “manual de usuario” donde se describen las diferentes pantallas que la componen, así como la utilidad de cada comando.

### **5.1 Descripción del proceso de ensayo con equipo MEGHA.**

Para iniciar el programa es necesario abrir la hoja de cálculo PFC.xls, una vez habilitadas las macros, aparece la página “Inicio” (véase figura).

En la página Inicio se ofrecen dos alternativas para iniciar la sesión: la primera orientada al ensayo de huecos de tensión MEGHA; y la segunda, orientada al ensayo de huecos de tensión y sobretensiones del equipo QuEST LAB. A continuación se muestran ambas alternativas con mayor detalle:



*Figura 5.1: Pantalla inicio de la aplicación*

1. MEGHA. Esta alternativa permite al usuario acceder a la pantalla “datos de la instalación” donde se introducen los parámetros que definen la instalación en la que se llevará a cabo el ensayo, y hacer las modificaciones que considere oportunas. Todas las acciones posibles se detallan más adelante.

2. QuEST lab. Con este botón se permite acceder “datos de la instalación”.

La aplicación permite volver a la página “inicio” desde cualquier pantalla pulsando el botón “Inicio” habilitado en la parte inferior de cada pantalla.

Pulsando sobre el primer botón MEGHA, se abre la pantalla “datos de la instalación” donde se pueden visualizar los datos que el usuario introduce y que la aplicación se encarga de enviar a Excel donde serán empleados para los cálculos del ensayo.



*Figura 5.2: Pantalla DATOS INSTALACION*

El nombre de esta pantalla aparece en la esquina superior izquierda DATOS INSTALACION. En la esquina superior derecha también se podrá seleccionar cerrar la pantalla. El aspecto que tiene es el mostrado en la figura 5.2.

Al abrirse la pantalla, inicialmente aparecen todos los cuadros de texto vacíos de datos. La pantalla se divide en tres secciones: la parte de la izquierda se compone de los datos que el usuario debe introducir en los cuadros de texto con respecto a la red, tensión nominal y potencia de cortocircuito aparente de la red en el PCC (punto de conexión); en el cuadro central se introducen los datos del transformador de la subestación, es decir, tensión nominal devanado de primario, tensión nominal del devanado secundario, potencia aparente nominal, el tipo de conexión seleccionable mediante el desplegable (Estrella-Estrella, Estrella-Triángulo, Triángulo-Triángulo, Triángulo-ZigZag) y la tensión de cortocircuito de forma porcentual; por último en la parte derecha introducimos los datos de la turbina, potencia nominal y tensión nominal. Con estos valores y pulsando el botón calcular, la aplicación nos devolverá el valor de la corriente de cortocircuito aportada por la turbina (considerando una aportación en cortocircuito de dos veces la corriente nominal). Además en la pantalla encontramos los siguientes botones:

1. Botón Inicio. Devuelve la aplicación a la página inicial. En caso de haber hecho alguna modificación, quedará registrada en última versión guardada. Si el usuario no desea que los cambios permanezcan, se recomienda cerrar la aplicación sin guardar cambios.
2. Botón Datos TI/TT RED. Se abre una nueva hoja de usuario donde se visualizan los valores de primario y secundario de los transformadores de medida de tensión y

corriente. Esta pantalla, tanto para en el lado de red como para la turbina se han creado con la idea de, en un trabajo futuro, conocer los valores de tensión y corriente en secundario y que puedan ser utilizados para otras aplicaciones, como por ejemplo, el cálculo de ajuste de protecciones.

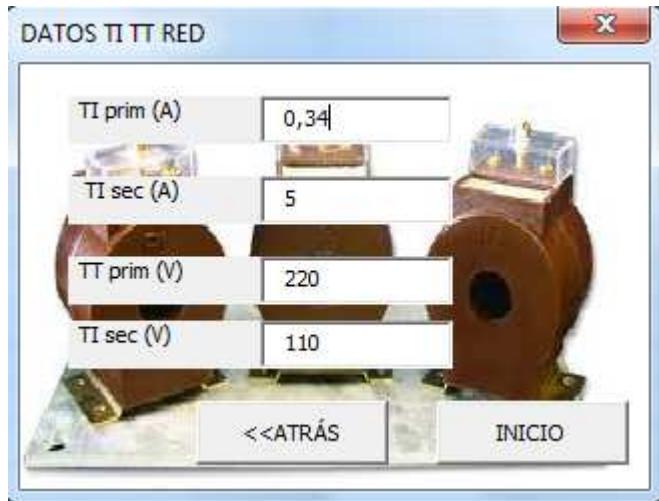


Figura 5.3: Pantalla DATOS TI TT RED

3. Botón Datos TI/TT TURBINA. Lo mismo que el anterior botón pero para la medida del lado turbina.

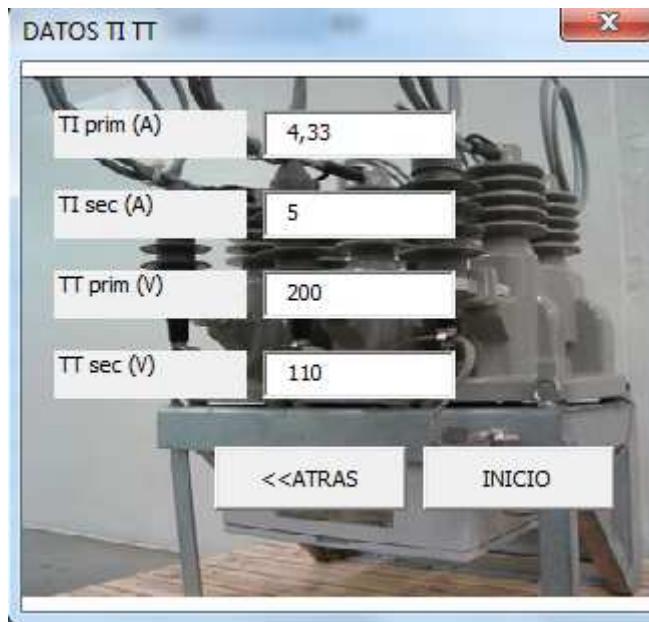


Figura 5.4: Pantalla DATOS TI TT AEROGENERADOR

4. Botón Siguiente. Permite pasar a la página siguiente de condiciones de ensayo.

Si el usuario pulsa el botón SIGUIENTE, aparecerá la hoja “CONDICIONES DE ENSAYO”. El nombre de esta pantalla aparece en la esquina superior izquierda. La pantalla se compone de los siguientes botones:



Figura 5.5: Pantalla CONDICIONES DE ENSAYO.

1. Botón Atrás. Al pulsar este botón la aplicación vuelve a la página anterior, “DATOS DE LA INSTALACIÓN”.
2. Botón desplegable Inductancia serie. En el campo Inductancia serie están disponibles los diferentes ajustes de que dispone la inductancia serie. El usuario puede elegir aquel valor que a priori crea adecuado para realizar el ensayo deseado. Posteriormente se permitirá de forma sencilla cambiar este valor seleccionado en función de los resultados obtenidos.
3. Botón desplegable Rama Falta. El usuario puede elegir el valor de la resistencia en la rama paralelo. Igual que en el caso anterior se selecciona un valor inicial para realizar un cálculo aproximado inicial.
4. Botón desplegable Uprim. El usuario puede elegir el valor de la tensión en el primario del transformador de la rama en paralelo.
5. Botón desplegable Usec. El usuario puede elegir el valor de la tensión en el secundario del transformador de la rama en paralelo.
6. Botón Conexión. Una vez elegidas las tensiones de primario y secundario del transformador el usuario deberá pulsar este botón para conocer cuál es la conexión

elegida, que aparecerá en la ventana de texto que hay debajo del botón conexión, y que servirá al operario para la conmutación manual del ajuste.

Una vez introducidos los valores característicos de la turbina a ensayar, pulsando el botón Siguiente el usuario accede a la pantalla “Esquema”, donde aparecen una representación gráfica del equipo de ensayo MEGHA y todos los resultados obtenidos en los cálculos. A continuación se explica, paso por paso, las opciones que ofrece esta ventana.

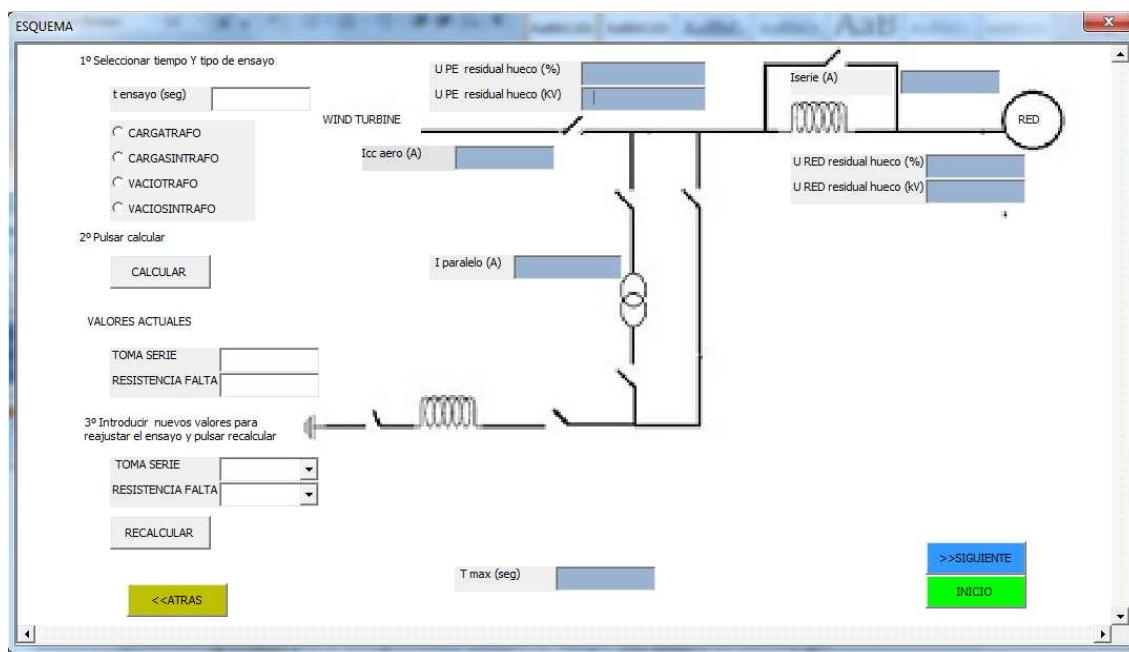


Figura 5.6: Pantalla ESQUEMA

1. En la parte superior izquierda aparecen cuatro botones con las distintas opciones de ensayo entre las que el usuario debe elegir: cargatrafo, cargasintrafo, vaciotrafo, y vaciosintrafo. Es decir, con esta opción se selecciona si se ensaya el aerogenerador conectado a la red o desconectado (carga/vacio), y si existe transformador en paralelo en la rama de falta o únicamente ésta tiene resistencia de falta (trafo/sin trafo)
2. Cuadros de texto de toma serie y resistencia de rama de falta donde aparecen los valores elegidos inicialmente en la ventana “condiciones de ensayo”. Esta información facilita al usuario el reajuste de las condiciones de ensayo ya que le permite conocer los ajustes inicialmente empleados para el cálculo del hueco y modificarlos si fuese necesario.
3. Botón Calcular. Después de cambiar cualquier ajuste del equipo, el usuario tiene que pulsar este botón para que la aplicación calcule y rellene todos los cuadros sombreados que aparecen en la pantalla: tensión residual ( $U$  residual), intensidad serie ( $I_{serie}$ ), intensidad aportada por el aerogenerador durante el ensayo ( $I_{cc\ aero}$ ) e intensidad que circulará por la rama de falta durante el ensayo ( $I_{paralelo}$ ) así como el tiempo máximo admisible de duración del ensayo ( $t_{max}$ ).

4. Una vez calculado el hueco (calcular) el programa permite de forma rápida cambiar el ajuste tanto de la inductancia serie como de la rama de falta, para recalcular un nuevo hueco de tensión en el proceso de ajuste del ensayo.

5. Ventanas de texto de los tiempos de ensayo. El usuario debe introducir el tiempo de ensayo que desea llevar a cabo, la aplicación lo comparará con el tiempo máximo permitido y si el tiempo de ensayo elegido es menor al tiempo máximo admisible la aplicación mostrará el tiempo en verde, en caso contrario, aparecerá en rojo y saltará una ventana de error anunciando un tiempo excesivo.

6. Pulsando el Botón Siguiente el usuario entra en la última ventana “datos” la cual permitirá, pulsando el botón que aparece en la misma, generar un informe final en formato Word con el resumen de todos los ajustes calculados para generar el hueco deseado por el usuario, y que deberá ser entregado al técnico de campo para que mediante su implementación en el equipo de ensayo MEGHA se pueda llevar a cabo el ensayo.

## **5.2 Descripción del proceso QuEST LAB.**

Para realizar la simulación con el equipo de ensayos QuEST LAB pulsamos el botón INICIO para acceder a la página “INICIO”, o arrancamos el programa si este no se encontraba ya abierto, y hacemos clic en el botón QuEST LAB.

Al hacer clic se accede a la página “DATOS DE LA INSTALACIÓN”, la cual se divide en tres partes, en las que se introducen los datos de la red, transformador de la subestación y aerogenerador donde se realiza el ensayo. En esta página el usuario debe introducir los valores correspondientes a la instalación eólica de las partes nombradas anteriormente, estos valores los enviará la aplicación a Excel para realizar los cálculos para los diferentes ensayos. En la sección derecha de datos del aerogenerador aparece el botón calcular que permite, una vez introducidos los valores de potencia y tensión nominal del aerogenerador, obtener la corriente de cortocircuito que circula por la rama de la turbina (imagen 5.7)

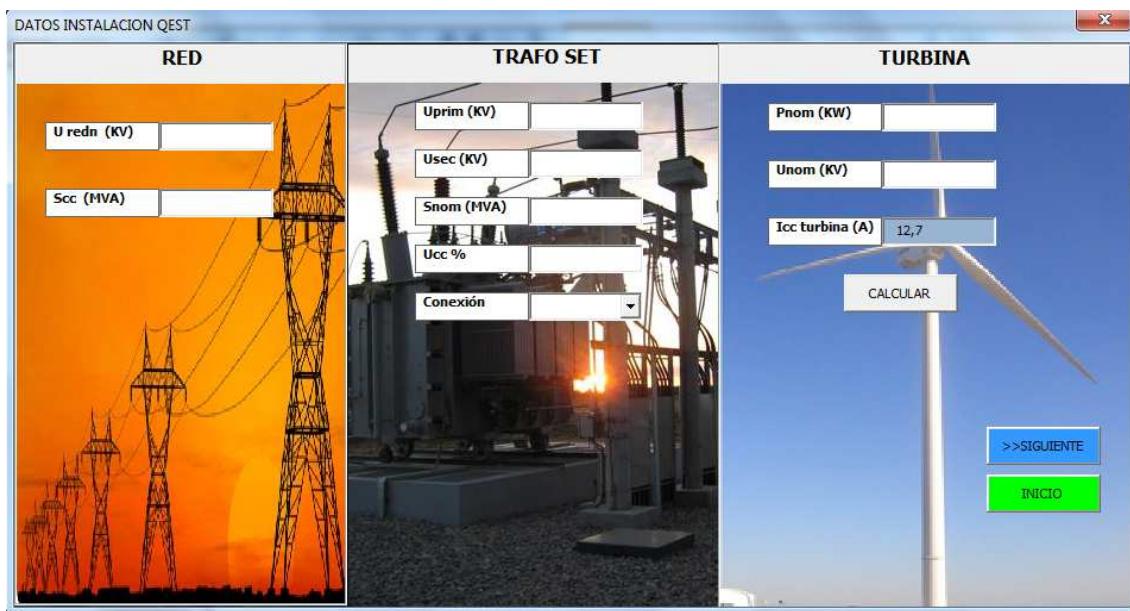


Figura 5.7: Pantalla DATOS INSTALACION QuEST.

Una vez se introducidos todos los datos se pulsa el botón “Siguiente” para acceder a la ventana “CONDICIONES DE ENSAYO”.



Figura 5.8: Pantalla CONDICIONES DE ENSAYO QuEST.

En esta pantalla se eligen los ajustes de del equipo de ensayos. Primeramente el usuario debe elegir la inductancia serie, haciendo clic el botón desplegable y seleccionando uno de los valores disponibles, a continuación el usuario debe elegir la impedancia de falta mediante el correspondiente botón desplegable. Seguidamente se elige la conexión del transformador eligiendo el valor de primario y de secundario del mismo para, pulsando el botón “CONEXIÓN” obtener la conexión real que corresponde a dichas tomas de ambos devanados. Pulsando el botón siguiente se accede a la pantalla “condiciones de ensayo” donde se aprecia el esquema del equipo QuEST LAB donde se plasman todos los resultados obtenidos.

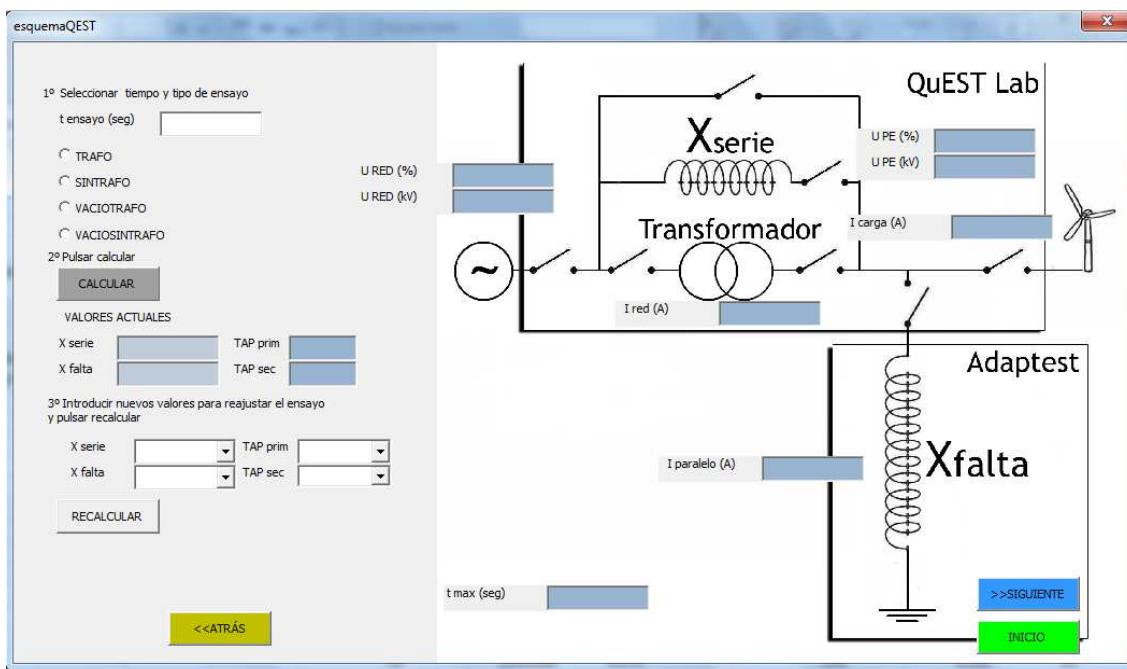


Figura 5.9: Pantalla ESQUEMA QuEST.

En la pantalla esquema deberemos elegir en primer lugar, mediante los cuatro botones de opción que aparecen, el tipo de ensayo que queremos llevar a cabo: con o sin transformador y si el ensayo será con el aerogenerador en carga o en vacío. Un poco más abajo aparecen dos ventanas de texto, una para seleccionar la inductancia serie y otra para la inductancia de la rama de falta que se han elegido previamente en la página “CONDICIONES DE ENSAYO”. A través del botón “CALCULAR” obtenemos los valores que tendríamos para la corriente aportada por la red durante el ensayo, la corriente aportada por el aerogenerador y la corriente de la rama en paralelo, así como el tiempo máximo de ensayo admisible y la tensión que obtendremos en el punto de ensayo (PE). Si el resultado del ensayo no es el deseado la aplicación permite reajustar los valores de las inductancias haciendo clic en los dos desplegables de inductancia serie e inductancia de falta que aparecen un poco más abajo. Otro de los parámetros que deben seleccionarse es el tiempo de ensayo deseado; en este caso, la herramienta compara este valor con el tiempo máximo admisible por el equipo de ensayo para los ajustes escogidos, y nos muestra un mensaje en color verde si el tiempo de ensayo es menor al tiempo máximo admisible o en rojo y una ventana de alarma si el tiempo de

ensayo seleccionado sobrepasa el tiempo máximo admisible. Una vez el resultado es el deseado por el usuario se hace clic en el botón “Siguiente” y accedemos a la página datos, en ella aparece un botón de informe, que al pulsarlo el usuario genera automáticamente un documento Word con todos los datos introducidos para el caso en estudio. Esta hoja será la que se entregará en última instancia al técnico de campo para que lleve a cabo el ensayo de sobretensión simulado en la herramienta sin más dificultad que implementar los ajustes calculados mediante esta aplicación en los distintos elementos.

### **5.3 Caso práctico.**

Objetivo: Se pretende realizar un ensayo de hueco de tensión para validación de la calidad de red de una turbina eólica de 1,5MW según las normativas españolas P.O. 12.3 y alemana FGW. El aerogenerador se encuentra en el parque eólico propiedad del cliente.

El sistema eléctrico de un parque eólico tiene por objeto la transferencia de la energía producida por cada aerogenerador hacia la red de la compañía eléctrica. La legislación española limita la potencia de un parque eólico hasta los 50 MW para poder acogerse al régimen especial establecido en el Real Decreto 436/2004 y acogerse al sistema de primas.

El diseño del sistema eléctrico de cada parque eólico puede variar en función de la distancia entre aerogeneradores, potencia instalada y distancia al centro de transformación, pero la composición del mismo se basa principalmente en los siguientes elementos que se van a describir:

#### **Instalación de Baja Tensión (BT)**

Esta instalación es interna a cada aerogenerador, es decir, cada aerogenerador posee una serie de circuitos internos que conectan la salida del generador con el centro de transformación, también interno, que eleva el potencial eléctrico de salida desde Baja Tensión (unos 690 V) hasta Media Tensión (normalmente 20 o 30 kV). Este transformador está localizado dentro de la torre y el transformador se conecta a dos celdas de Hexafloruro, una para el primario y otra para el secundario del transformador.

A continuación se muestra el diagrama unifilar de la instalación eléctrica del interior de un aerogenerador G52 de 850 kW modelo objeto de ensayo en este caso de estudio.

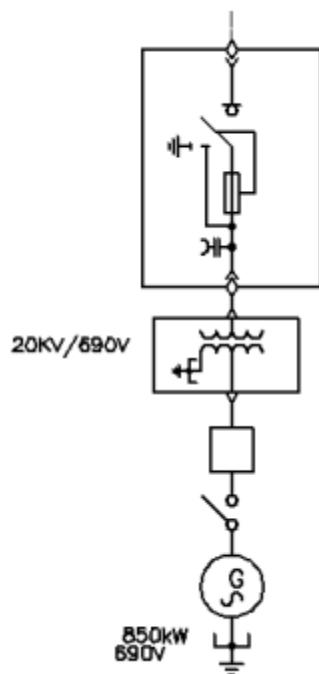


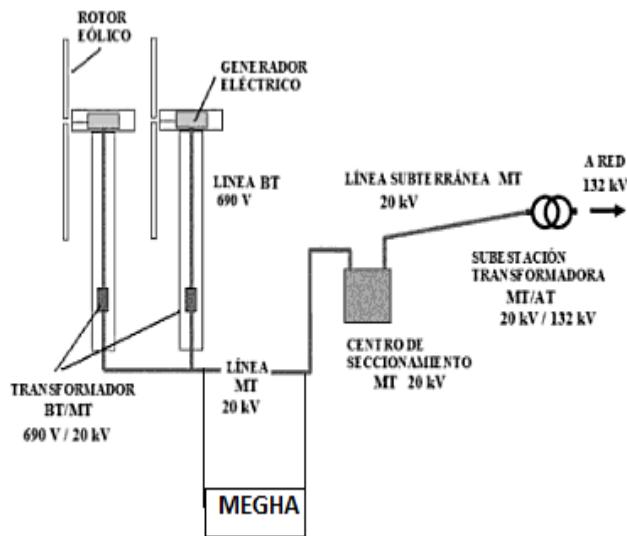
Figura 5.10: Diagrama unifilar de un aerogenerador modelo.

### Red de Media Tensión (MT)

Esta red conecta a los aerogeneradores entre si y a la subestación del parque eólico. Por ello, el trazado de la red de MT se basa en la disposición de los aerogeneradores, pero se tendrá siempre en cuenta el uso de la menor cantidad de cable posible. La unión se realizará siempre en cada aerogenerador donde se dispondrá, en cada uno de ellos, de una arqueta donde llegarán los cables de media tensión, de comunicación y de puesta a tierra.

El conductor utilizado será del tipo aislado con goma de etileno propileno (EPR). La red discurrirá por el parque enterrado bajo suelo, los cables se dispondrán de arquetas de registro.

En la figura 5.11 se muestra un croquis con la distribución de la red de media tensión y la disposición del MEGHA.



**Figura 5.11:** Esquema parque eólico donde se conecta el equipo de ensayos MEGHA.

### Puesta a Tierra

Además de las canalizaciones descritas, cada aerogenerador debe estar provisto de una toma de tierra cuya función será principalmente la protección frente a descargas y rayos y que vendrá condicionada por las características del terreno donde se desarrolle.

El tendido estará formado por un cable de cobre que unirá todos los aerogeneradores y la subestación eléctrica, el empalme de los cables, al contrario que el cableado de media tensión, se podrá realizar en cualquier tramo mediante soldadura.

El cableado de Puesta a Tierra en cada aerogenerador se realizará sobre el hormigón de cimentación. La puesta a tierra será revisada periódicamente por una empresa subcontratada.

### Centro de Transformación

El centro de transformación y seccionamiento consistirá en una estructura prefabricada, acorde con el medio rural, en la cual se transformarán los niveles de MT de las líneas de transmisión del parque en valores superiores de tensión, para su transporte por la red.

Con esto se evitarán principalmente las pérdidas de energía ocasionadas en el transporte de la electricidad por el efecto Joule.

El centro contará con una entrada subterránea de cable seco a 20 kV y una salida aérea a 132 kV.

En el interior se dispondrán de celdas de media tensión para la protección y transformadores que elevarán la tensión a unos 132 kV.

## **Red de Alta Tensión (AT)**

La evacuación de la energía producida por el parque eólico será en forma de Alta Tensión, 132 kV, de tal manera que las pérdidas a causa de caídas de tensión disminuirán.

Esta red se distribuirá externamente al parque eólico y llegará a otros centros de seccionamiento donde se reducirá la tensión conforme nos acerquemos a los centros de consumo.

Cómo paso previo a la ejecución del ensayo real en la instalación anteriormente descrita, será necesario calcular previamente los parámetros necesarios a ajustar en el equipo de ensayos para obtener los valores esperados en el menor número de ensayos posibles. En este apartado se describen los cálculos a realizar mediante la aplicación desarrollada en este proyecto de gran utilidad para obtener de forma rápida los ajustes óptimos. Se realizaran un ensayo de hueco de tensión y otro de sobretensión respectivamente.

### **5.3.1 Ensayo de hueco de tensión**

Queremos generar un hueco de tensión del 25% de tensión residual (Ures) de una duración del ensayo de 520 ms en carga, es decir con el aerogenerador conectado. El ensayo será llevado a cabo a una red de 132 kV y cuya potencia de cortocircuito, según dato proporcionado la compañía eléctrica es de 130 MVA.

El transformador de la subestación del parque donde se realiza el ensayo consta de una tensión de primario de 132 kV y de una tensión de secundario de 12 kV, tiene una potencia aparente nominal de 80 MVA, su tipo de conexión es estrella-estrella y la tensión de cortocircuito porcentual del 6% como indica su placa de características.

El aerogenerador a ensayar tiene una potencia nominal de 1500 kW, una tensión nominal de 12 kV lo que permite calcular a la aplicación la corriente nominal y de cortocircuito (según la consideración de aportación del doble de la corriente nominal) del mismo.

Introducimos los datos deseados en la pantalla datos de la instalación;



Figura 5.12: Pantalla DATOS INSTALACIÓN con los valores introducidos.

Una vez introducidos los datos de la red, el transformador y la turbina introducimos los siguientes ajustes iniciales en la pantalla “CONDICIONES DE ENSAYO”, basándonos en ensayos similares:



Figura 5.13: Pantalla CONDICIONES DE ENSAYO con los ajustes introducidos.

Introducimos el tiempo de ensayo en este caso 520 ms y elegimos la opción carga, utilizando el transformador en la rama de falta o paralelo e introducidos los ajustes iniciales de la inductancia series y la rama de falta, así como el tipo de conexión del

transformador de la rama de falta, dependiente de su tensión de primario y secundario, obtenemos los primeros resultados para la opción de ensayo en carga y con transformador.

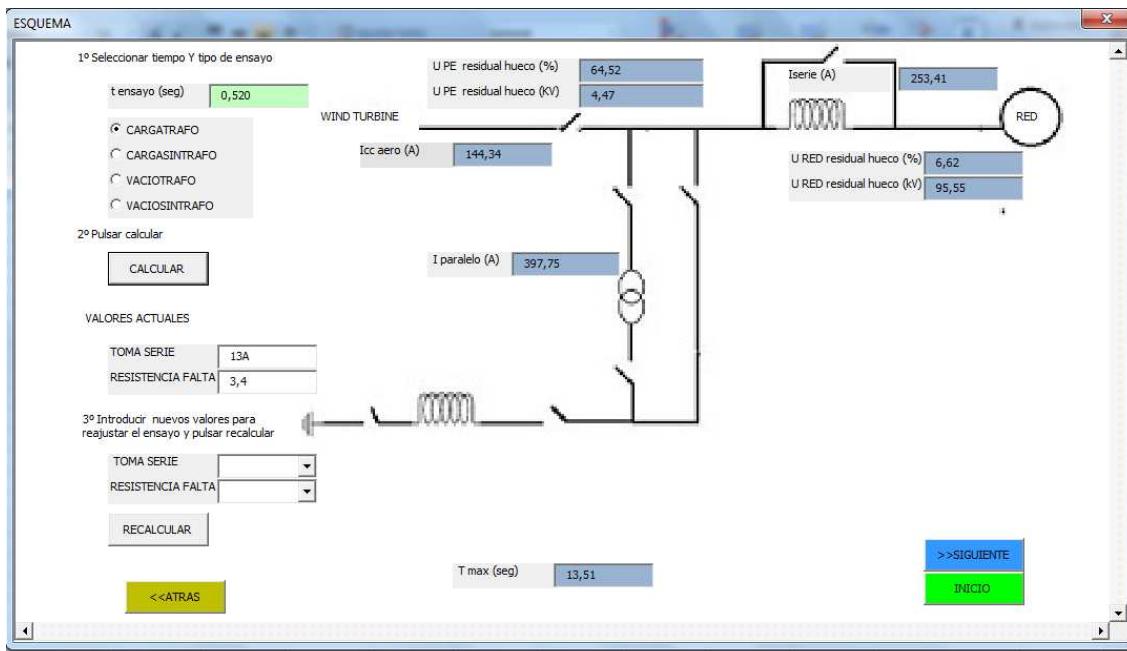


Figura 5.14 Pantalla ESQUEMA con los resultados obtenidos.

Como se aparece en la figura, el ensayo obtenido alcanza una tensión residual durante el hueco de 64,52%, lejos de los 25% que se desea obtener. Como el hueco de tensión resultante no es el deseado recalculamos cambiando los ajustes.

Se elige la opción vacío con transformador, toma serie 3A y resistencia de falta de 1,6 ohmios, obteniendo el 25% de hueco que se deseaba en el ensayo, como se ve en la imagen inferior.

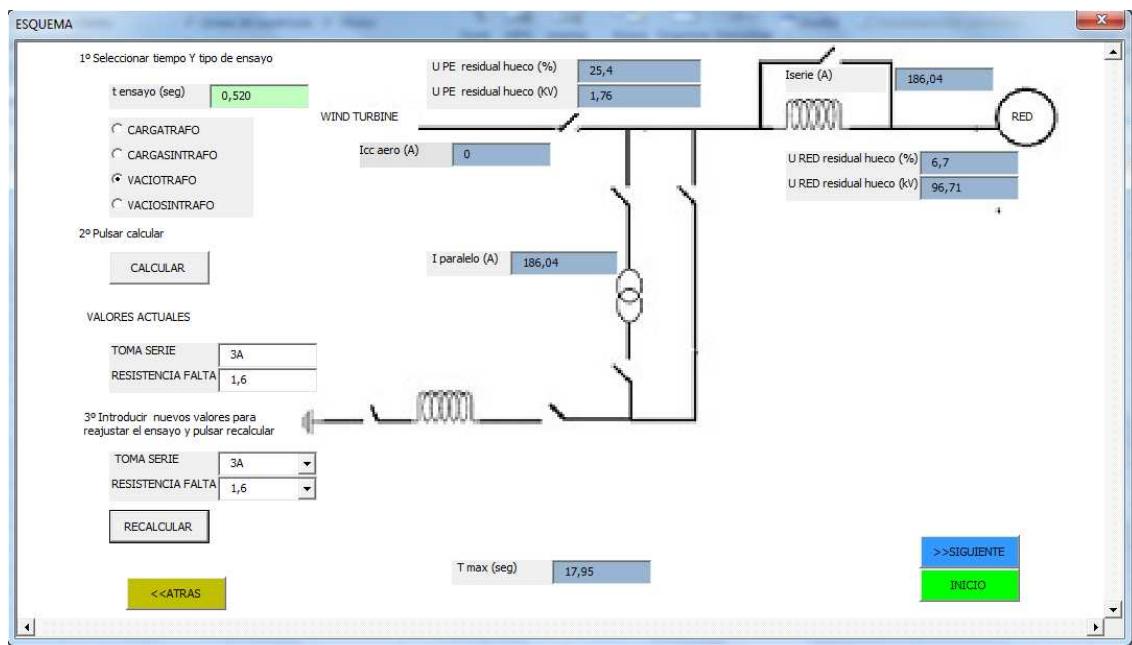


Figura 5.15: Pantalla ESQUEM con los resultados recalcados.

Una vez obtenidos los ajustes necesarios, la aplicación nos genera el siguiente informe de ensayo, como el que aparece a continuación, que será entregado al correspondiente técnico de campo para que pueda llevar a cabo el ensayo real simplemente ajustando en el equipo MEGHA los parámetros calculados con la aplicación.

## **INFORME DE ENSAYO**

El siguiente informe de ensayo recoge los valores de ajuste que han de ser implementados en el equipo de ensayo MEGHA para llevar a cabo el ensayo solicitado.

### **DATOS DE LA INSTALACIÓN**

#### **1. RED**

Unominal (kV) = 132

Scc (MVA) = 130

Zred (Ohm) = 1,11

#### **2. TRANSFORMADOR SET**

Uprimario (kV) = 132

Usecundario (kV) = 12

Snominal (MVA) = 80

Conexión = Estrella-Estrella

Ztransformador (Ohm) = 0,11

Ucc% = 6

#### **3. AEROGENERADOR**

Pnominal (kW) = 1500

Unominal (kV) = 12

Icc(x2 In) = 144,34

### **DATOS DEL ENSAYO**

#### **4. TIPO DE ENSAYO**

Fases en falta: ENSAYO TRIFÁSICO

Tipo de conexión aerogenerador: Vacío

Duración del ensayo (s) =0,520

Profundidad de hueco (%)=25,4

## 5. AJUSTES EQUIPO DE ENSAYOS MEGHA

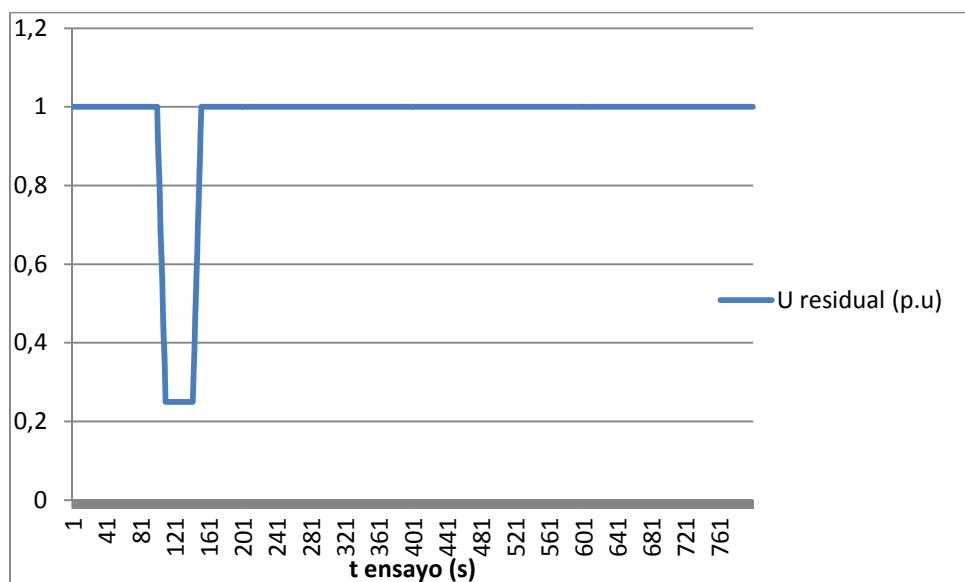
A continuación se muestran los valores a ajustar en los distintos elementos del equipo MEGHA:

Bobina serie (Ohm) =26,57 (TOMA 3A)

Z transformador (Ohm) =7,85 (Conexión 2)

Resistencia de falta (Ohm) =1,6

## 6. GRÁFICA HUECO DE TENSION A GENERAR



Una vez obtenidos los resultados, el técnico encargado de realizar el ensayo en campo enviará al equipo MEGHA los valores obtenidos para ejecutar el ensayo que desea el cliente de la instalación proporcionados por la aplicación en la hoja de ensayos a través del SCADA (ejemplo figura posterior) instalado en el centro de control del equipo de ensayos.

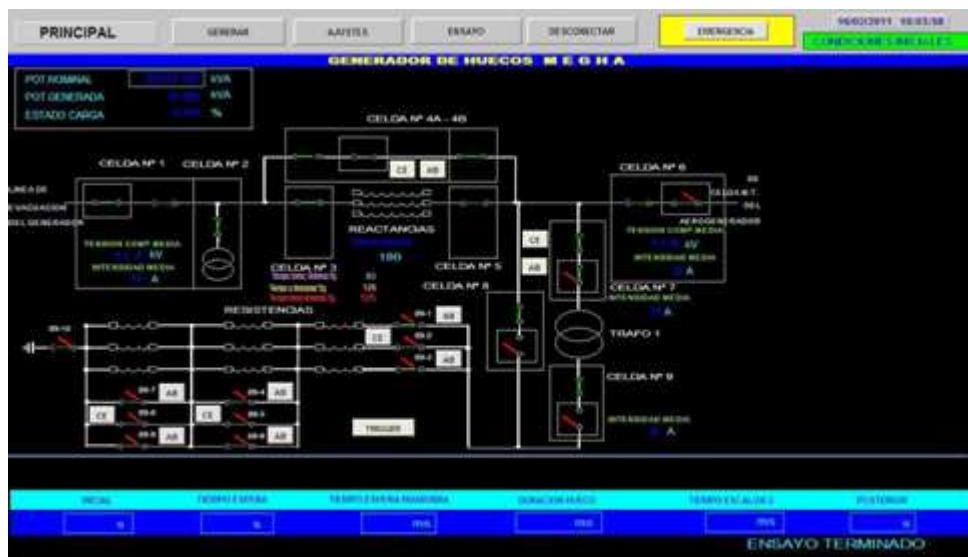


Figura 5.16: Ejemplo pantalla SCADA MEGHA.

Una vez implementados estos ajustes se lleva a cabo el ensayo real en campo y se obtienen los siguientes resultados en el ensayo real (datos reales de ensayo con los ajustes de ejemplo proporcionados por la empresa 4FORES):

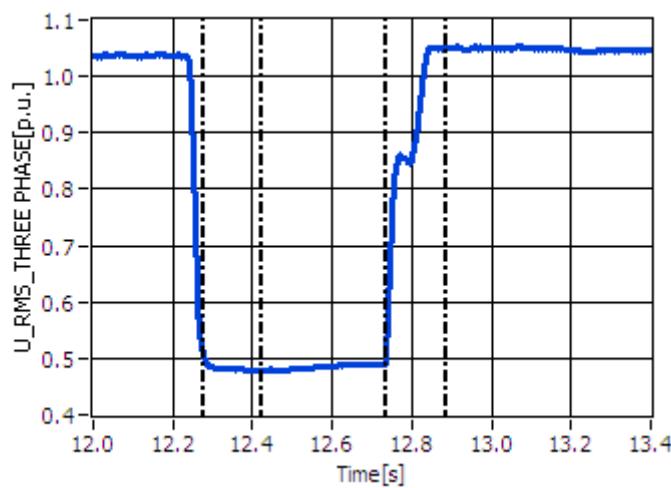


Figura 5.17: Hueco de tensión 25% obtenido en un ensayo real.

#### PARÁMETROS BÁSICOS DEL ENSAYO

Duración del hueco [ms] = 520.000

Tensión residual [p.u.] = 0.25

Frecuencia red R [Hz] = 50.03

Frecuencia red S [Hz] = 50.03

Frecuencia red T [Hz] = 50.03

Potencia generación previa [p.u.] = 0.79 - 0.78

Continuidad de suministro = OK

Tensión residual [p.u.] = 0.25071

Duración hueco [ms] = 520.00000 (OK)

Recuperación de potencia antes de 1 s = OK

Tiempo de recuperación del hueco [ms] = 80.00

Tiempo de caída del hueco [ms] = 25.00

Tipo de hueco: Trifásico

Frecuencia de red [Hz] = 50.000

Tensión base eficaz fase [kV] = 6.928

Potencia base [MW] = 1.500

Intensidad nominal [A] = 72.160

Una vez obtenidos todos los resultados del ensayo real, se comparan los resultados con los resultados teóricos proporcionados por la aplicación y, se comprueba el error menor al 5%, con lo que la aplicación se da por validada.

### **5.3.2 Ensayo de sobretensión**

A continuación se va a realizar el caso práctico de un ensayo de sobretensión con el equipo de ensayos LAB. En primer lugar se introduce la información del tipo de ensayo que se quiere ejecutar, en este caso se trata de una sobretensión del 118% de tensión de ensayo con una duración del ensayo de 1540 ms. El ensayo será llevado a cabo en un parque eólico conectado a una red de 132kV y cuya potencia de cortocircuito proporcionada por la compañía es de 130MVA.

En cuanto al transformador de la subestación en la cual se conecta el equipo de ensayos, según los datos habilitados en la placa de características, la tensión de primario es de 132kV, la de secundario de 12kV, una potencia nominal aparente de 80MVA, tipo de conexión estrella-estrella y una tensión proporcional de cortocircuito del 6%.

El aerogenerador tiene una potencia nominal de 1500kW y una tensión nominal de 12KV.

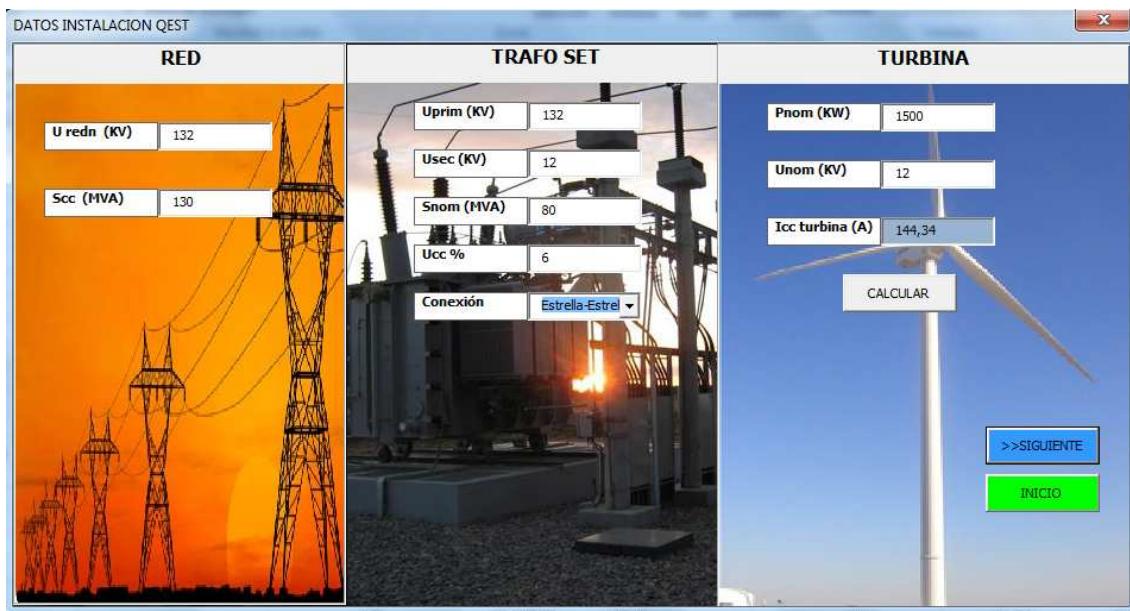


Figura 5.18: Pantalla DATOS INSTALACION QEST con los datos introducidos.

Una vez introducidos los datos de la red, el transformador y la turbina introducimos los siguientes ajustes iniciales en la pantalla “CONDICIONES DE ENSAYO”.



Figura 5.19: Pantalla CONDICIONES ENSAYO QuEST con los ajustes introducidos.

Eligiendo la opción de ensayo a través de transformador e introducidos los ajustes iniciales de la inductancia serie y de la inductancia de la rama de falta, así como la conexión del transformador, y valores de TAP de su primario y secundario, obtenemos los primeros resultados.

Como se aparece en la figura de abajo, el ensayo obtenido alcanza una tensión residual durante el hueco de 11,4%, que no corresponden a los 118% que se querían obtener, por lo que deberemos seleccionar unos nuevos ajustes.

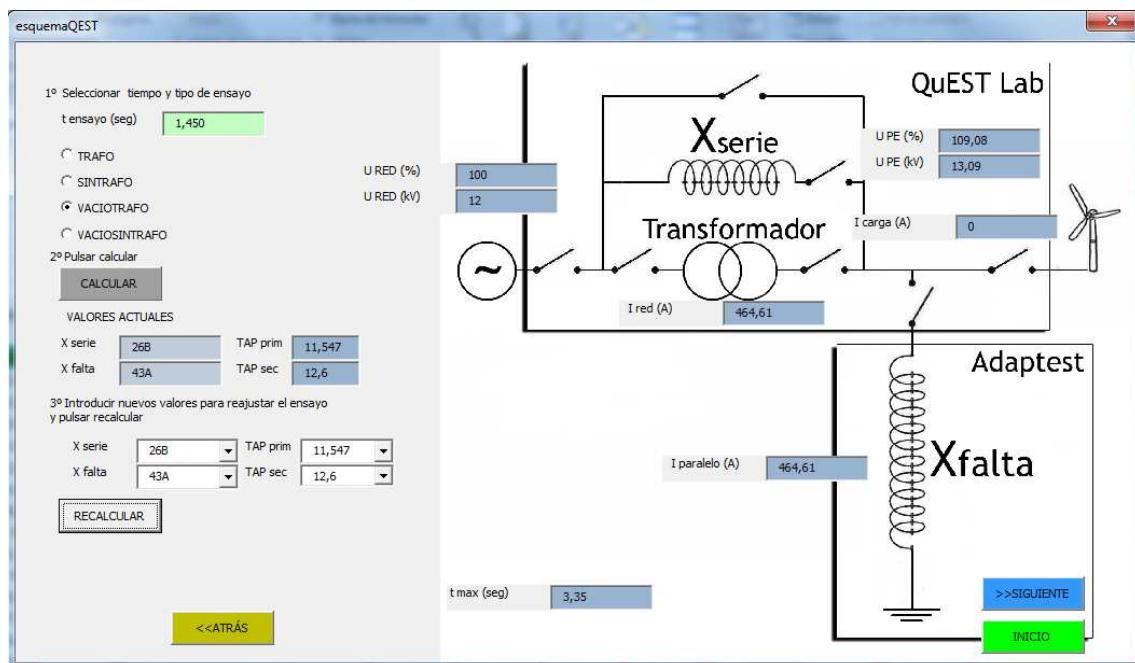


Figura 5.20 Pantalla ESQUEMA QUEST con los resultados obtenidos.

Se elige la opción de ensayo sin transformador, cambiamos la inductancia serie a 26B y la inductancia de falta a 43A y 11,437 y 12,6 kV en los TAP obteniendo así la tensión residual deseada de 118%, a partir de aquí el programa nos permite elaborar automáticamente el siguiente informe de ensayo.

## **INFORME DE ENSAYO**

El siguiente informe de ensayo recoge los valores de ajuste que han de ser implementados en el equipo de ensayo QuEST LAB para llevar a cabo el ensayo solicitado.

### **DATOS DE LA INSTALACIÓN**

#### **1. RED**

Unominal (KV) = 132

Scc (MVA) = 130

Zred(Ohm) = 1,11

#### **2. TRANSFORMADOR SET**

Uprimario (KV)=132

Usecundario (KV)=12

Snominal (MVA)=80

Conexión=Estrella-Estrella

Ztransformador(Ohm)=0,11

Ucc%=6

#### **3. AEROGENERADOR**

Pnominal (KW)=1500

Unominal (KV)= 12

Icc(x2 In)= 144,34

#### **4. TIPO DE ENSAYO**

Fases en falta: ENSAYO TRIFÁSICO

Tipo de conexión aerogenerador: (Carga)

Duración del ensayo= 1,540

Profundidad de hueco= 118,5

## 5. AJUSTES EQUIPO DE ENSAYOS QuEST LAB

A continuación se muestran los valores a ajustar en los distintos elementos del equipo QuEST LAB:

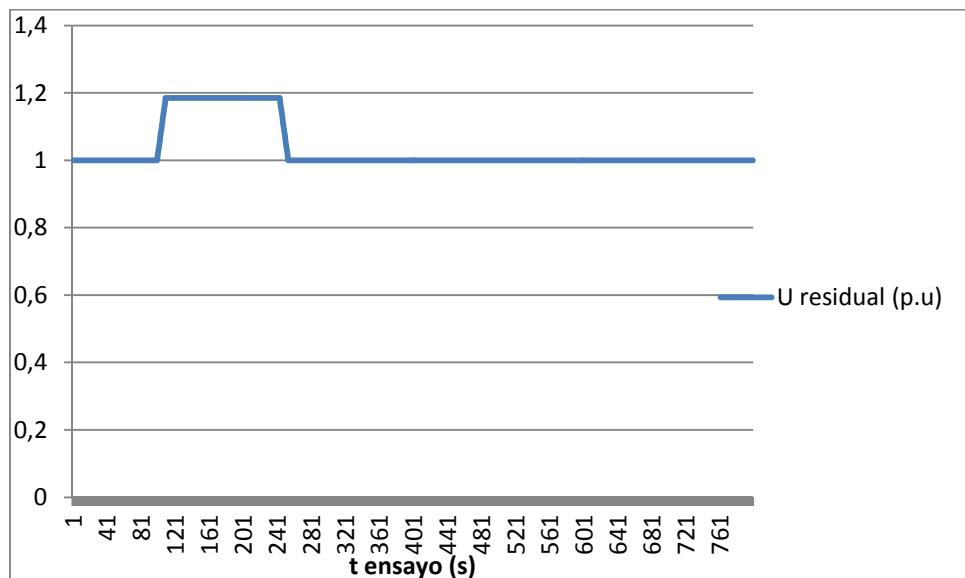
Xserie (Ohm)= 13,502 (Toma 26B )

Xfalta(Ohm)= 7,85 (Toma 43A )

Ztrafo(Ohm)= 0

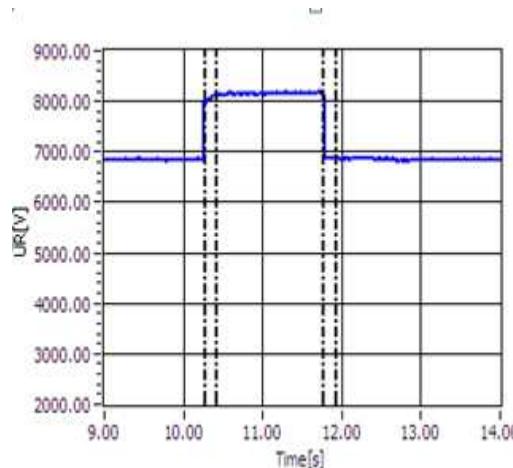
(Introducir los ajustes del equipo: Bobina serie, transformador y resistencias)

## 6. GRÁFICA HUECO DE TENSIÓN A GENERAR



Una vez obtenidos los resultados, el técnico encargado de realizar el ensayo en campo enviará a QuEST LAB a través del sistema SCADA, los valores de ajustes obtenidos con la aplicación para ejecutar el ensayo deseado.

Este ensayo fue llevado a cabo de forma real en campo obteniéndose los siguientes resultados (datos proporcionados por la empresa 4FORES).



**Figura 5.21** Gráfica 118% obtenida en un ensayo real con QuEST lab.

Duración del ensayo [ms] = 1540.000

Tensión residual [p.u.] = 1.18

Frecuencia red R [Hz] = 50.01

Frecuencia red S [Hz] = 50.01

Frecuencia red T [Hz] = 50.01

Potencia generación previa [p.u.] = 0.98 - 0.97

Continuidad de suministro = OK

Tensión residual [p.u.] = 1.18313

Duración ensayo [ms] = 1540.00000 (OK)

Tensión residual [p.u.] = 1.17532

Duración ensayo [ms] = 1505.00000

Tensión base eficaz fase [kV] = 6.928

Potencia base [MW] = 1.500

Una vez obtenidos todos los resultados de campo y comparados con los resultados teóricos proporcionados por la aplicación, se obtiene un error menor al 5%, lo que permite validar el correcto funcionamiento de la aplicación creada en este proyecto.

## **6. CONCLUSIÓN**

### **6.1 Síntesis.**

En este capítuloaremos mención de las distintas conclusiones obtenidas tras la realización de este proyecto.

Para evaluar las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del proyecto debemos recordar los objetivos planteados al inicio del mismo: comprensión de los conceptos relacionados con el análisis de la calidad de red en generación eléctrica, aprendizaje del lenguaje de programación Visual Basic en el entorno Excel, análisis detallado de los equipos de ensayos de huecos de tensión y sobretensiones y desarrollo de una aplicación para su ajuste en campo. De esta forma podemos decir, como primera y más importante conclusión, que se han conseguido cubrir, de forma satisfactoria, los objetivos planteados al inicio.

El primer objetivo planteado me ha permitido adentrarme en el tema de la calidad de suministro de energía a la red por parte de las instalaciones renovables mediante un profundo análisis de la norma IEC 61400-21 que regula el comportamiento de los sistemas de energía frente a los huecos de tensión y otros parámetros que afectan a la calidad del suministro eléctrico como la regulación de potencia, armónicos, etc. Se ha realizado un trabajo de revisión y comprensión de los diferentes ensayos que se realizan en aerogeneradores para cumplir con la normativa, tanto española (PO 12.3), como internacional (Grid Codes Internacionales) dado el interés que suscitan estos temas en la actualidad del sector energético.

En segundo lugar, el proyecto me ha permitido conocer un nuevo lenguaje de programación como es Visual Basic para Excel. Este modo de programación me ha sido de utilidad a lo largo del proyecto y el desarrollo de una aplicación basada en este lenguaje me ha permitido poner en práctica los conocimientos adquiridos. Este punto comprende el entrenamiento y aprendizaje con el lenguaje Visual Basic para aplicaciones, así como el uso de objetos propios de la aplicación Excel.

En el tercer punto del proyecto se aborda el estudio de los equipos de ensayo MEGHA y QuEST LAB. En este sentido, tengo que agradecer a la empresa 4FORES su disponibilidad y predisposición prestada durante el proyecto, lo que me ha permitido conocer in situ la tecnología empleada en ambos equipos de ensayo e incluso he tenido la oportunidad de operar en ambos equipos durante la realización de ensayos reales de huecos de tensión. Con la información proporcionada por la empresa y las diferentes visitas que he realizado para comprender mejor el funcionamiento de ambos equipos he podido incluir en este proyecto las características principales que tienen en cuanto a funcionalidad, elementos que lo componen, modo de operación, sistema de comunicación empleado, etc. He creído conveniente incluir en este proyecto, para una mejor comprensión, los esquemas eléctricos de ambos equipos así como el detalle de los dispositivos que lo componen. Al final del apartado 4 se hace una breve introducción a los sistemas SCADA, con especial hincapié en el SCADA de que disponen ambos

equipos ya que se trata de una herramienta de vital importancia para la comunicación remota por parte de los técnicos de campo con los equipos de ensayo.

En relación con el segundo objetivo y como continuación del mismo, se plantea la tarea de desarrollar una aplicación en VBA que sirviera para la simulación de huecos de tensión para ajuste en campo del equipo MEGHA, y huecos de tensión y sobretensiones para el equipo QuEST LAB. Para ello se ha desarrollado y validado completamente la herramienta creada a tal efecto en la que, a partir de todos los datos particulares de la red donde se conectan los equipos: red equivalente, subestación y aerogenerador a ensayar, calcula de forma automática los parámetros adecuados para las tomas de las inductancias, resistencias y del transformador que componen el divisor inductivo generador de huecos y sobretensiones y que implementados posteriormente en el equipo de ensayos real, permiten llevar a cabo de forma rápida y precisa el ensayo en campo para verificación de la respuesta de los aerogeneradores.

La aplicación no sólo calcula los valores de ajuste necesarios para alcanzar el tipo de ensayo (hueco o sobretensión) deseado sino que además verifica que la duración del ensayo de cortocircuito o sobretensión es admisible por los distintos elementos que componen el equipo de ensayos MEGHA o QuEST LAB en base a la información proporcionada por el fabricante de cada elemento.

Una de los principales motivaciones del proyecto ha sido la de tratar de satisfacer una necesidad demandada por una empresa tecnológica del sector de las energías renovables. En este sentido, la conexión directa que he podido tener en todo momento con la empresa me ha permitido por una parte identificar una necesidad concreta existente en el mundo empresarial y por otro, validar el correcto funcionamiento de la aplicación desarrollada. Para ello, una vez creada la aplicación, como última fase del proyecto he tenido acceso a la información procedente de un ensayo real en campo realizado a partir de los ajustes calculados con la aplicación para un caso concreto de parque eólico y aerogenerador. Ambos ensayos de huecos de tensión y sobretensiones realizados por la empresa me han permitido validar el correcto funcionamiento de la aplicación mediante la comparación de los resultados proporcionados por el programa de simulación y los resultados reales del ensayo en campo.

En el segundo apartado antes de las conclusiones, se contextualiza el tema del proyecto en el sector de la energía eólica, se hace un resumen del conexionado a red, las diferentes estructuras de turbinas y de la evolución de dicha energía, para entender mejor el estudio del presente proyecto y de las nuevas tecnologías que mejoran la misma.

Como se ha comentado anteriormente el principal trabajo del autor ha consistido en la elaboración de la herramienta informática en VBA Excel, la cual me ha llevado un periodo de unos 5 meses incluidos el aprendizaje del lenguaje VBA, la creación del programa y la validación práctica.

En cuanto a la memoria escrita también ha supuesto un trabajo costoso, sobre todo en la parte referente al “manual de usuario” de la herramienta informática. Con la ayuda de ejemplos de otros programas similares lo he podido solventar y para la parte más descriptiva, me ha sido más fácil llevar a cabo esta labor debido a la gran cantidad de información que he podido recabar en cuanto a contenidos de huecos de tensión y características de los equipos de ensayos

### **5.2 Opinión personal.**

En definitiva se ha estudiado la temática de los ensayos de huecos de tensión y sobretensión en aerogeneradores con los equipos de ensayos MEGHA y QuEST LAB con los cuales se asegura que el aerogenerador cumple con las diversas normativas de generación y calidad de abastecimiento de energía a la red, tanto con la normativa española (P.O. 12.3), como con la normativa internacional (Grid Codes Internacionales).

El trabajo realizado me ha enseñado a aprender a programa en VBA, lo que para mí ha supuesto la principal dificultad del proyecto ya que era la primera vez que utilizaba este programa. El tiempo de aprendizaje y de realización me ha llevado la mayor parte del tiempo invertido en el proyecto pero confío en que me sirva para mi futuro profesional.

En cuanto a la temática del proyecto, me ha servido para aprender como se regulan ciertos aspectos en el sector de las energías renovables, más en concreto en la energía eólica, cual es el procedimiento seguido en la operación para llevar a cabo los ensayos de huecos de tensión y sobretensiones, aprender como funcionan los equipos de ensayos MEGHA y QuEST LAB, y comprender como se evalúa y controla la calidad de suministro de los aerogeneradores que eviten, en otras cuestiones, los cortes en la generación provocados por las caídas de tensión, ya que este fenómeno representa una de las mayores preocupaciones en las energías renovables, que en mi opinión son el futuro de la generación eléctrica.,

La realización de este proyecto me ha supuesto un gran esfuerzo como ya he comentado anteriormente por la novedad que suponía trabajar con un nuevo programa como VBA y también a la hora de redactar la memoria puesto que no había realizado hasta la fecha un trabajo de esta magnitud, con la dificultad que conlleva elegir los temas a tratar, organizar los temas de forma adecuada, hacerlo comprensible, etc.

### **5.3 Líneas futuras.**

Uno de las limitaciones de la aplicación desarrollada consiste en la realización de ensayos únicamente equilibrados. Por tanto, una de las futuras mejoras a introducir en la aplicación consistirá en la posibilidad de realizar ajustes para ensayos de huecos de tensión o sobretensiones monofásicas o bifásicas.

Además, de cara a satisfacer nuevas normativas el P.O. 12.2 de Red Eléctrica España, en fase de borrador en el momento de escribir este proyecto, se podrá ampliar la

funcionalidad de la aplicación de cara a satisfacer la necesidad de llevar a cabo ensayos de por ejemplo, variaciones de frecuencia.

Por último, como otra de las futuras líneas de trabajo que parten del resultado obtenido en este proyecto, consistirá en el ajuste de protecciones automático a partir de los resultados obtenidos en la simulación tanto para las protecciones internas del equipo de ensayos como de las protecciones instaladas en el parque eólico a nivel de máquina o de subestación. Para ello, la aplicación calcula en valores de secundario las corrientes y tensiones presentes en la instalación durante los distintos ensayos de forma que puedan ser reajustadas las protecciones como paso previo a la ejecución de los mismos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] J.L. Rodriguez Amenedo, J. C. Burgos Díaz, S. Arnaltes Gómez, *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*, Ed. Rueda, 2003.
- [2] J. S. Feito, *Máquinas eléctricas*, Prentice Hall, 2002.
- [3] PO 12.3. *Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas*, BOE No 254, pag. 37017, Octubre de 2006.
- [4] *Procedimiento de verificación, validación y certificación de los requisitos del P.O.12.3 sobre la respuesta de las instalaciones eólicas ante huecos de tensión*, Versión 4, Asociación Empresarial Eólica, Marzo de 2008.
- [5] Danish Wind Power Association, [www.windpower.org](http://www.windpower.org). Último acceso: Enero de 2009.
- [6] *Eólica 2008*, Asociación Empresarial Eólica, disponible en [http://www.aeeolica.es/doc/Eolica\\_2008\\_baja.pdf](http://www.aeeolica.es/doc/Eolica_2008_baja.pdf), Último acceso: Febrero de 2009.
- [7] *Final Report on the disturbances of 4 November 2006*, disponible en <http://www.ucte.org/resources/publications/otherreports/>. Último acceso: Febrero de 2009.
- [8] Red Eléctrica de España, [www.ree.es](http://www.ree.es), Último acceso: Febrero de 2009.
- [9] *Sistemas SCADA*. <http://www.galeon.com/hamd/pdf/scada.pdf>

### A. Norma PO 12.3 Requisitos que establece Red Eléctrica de España de respuesta frente a huecos de tensión de instalaciones eólicas.

Los siguientes ensayos son necesarios para la certificación del aerogenerador según el P.O. 12.3 de REE:

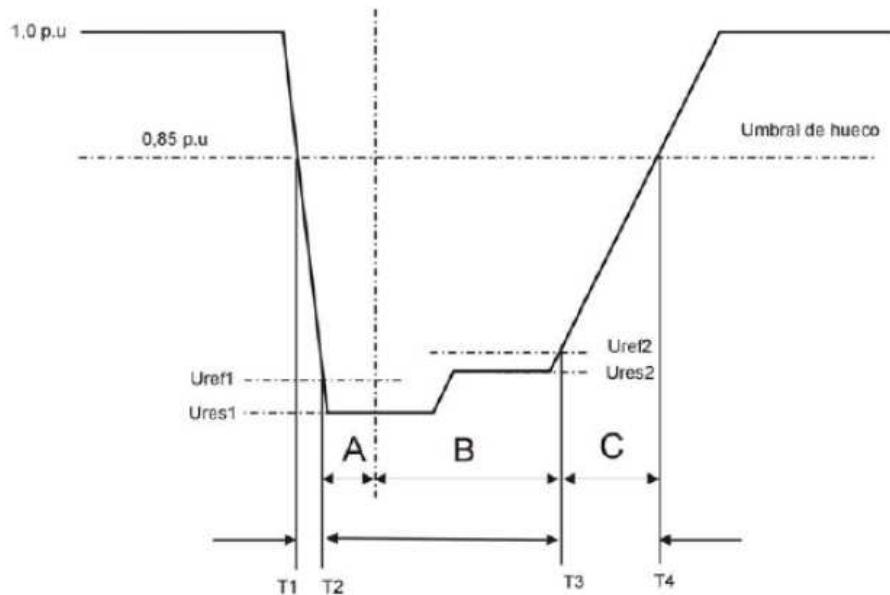
Hueco	Profundidad	Duración	Potencia de la máquina
BIFÁSICO	50-70 % U fase-neutro	$\geq 500$ ms	10- 30 % Pn
			80- 100 % Pn
TRIFÁSICO	10-23 % U fase-neutro	$\geq 500$ ms	10- 30 % Pn
			80- 100 % Pn

El aerogenerador objeto de ensayo debe permanecer conectado durante los huecos de tensión y cumplir los siguientes requisitos:

HUECO TRIFÁSICO	REQUISITOS P.O. 12.3 REE
<b>ZONA A</b>	
Consumo de Q < 15% Pn (20ms)	<b>-0,15 p.u.</b>
<b>ZONA B</b>	
Consumo de P < 10% Pn (20ms)	<b>-0,1 p.u.</b>
Consumo de Q < 5% Pn (20ms)	<b>-0,05 p.u.</b>
I reactiva / I total	<b>0,9 p.u.</b>
<b>ZONA C</b>	
Consumo de Ir < 1,5% In (20ms)	<b>-1,5 p.u.</b>

HUECO BIFÁSICO	REQUISITOS P.O. 12.3 REE
<b>ZONA B</b>	
Consumo de Er < 40% Pn (100ms)	<b>-40 ms*p.u.</b>
Consumo de Q < 40% Pn (20ms)	<b>-0,4 p.u.</b>
Consumo de Ea < 45% Pn (100ms)	<b>-45 ms*p.u.</b>
Consumo de P < 30% Pn (20ms)	<b>-0,3 p.u.</b>

Las zonas se definen según se indica en la figura siguiente.



*Caracterización del hueco de tensión en el ensayo de huecos de tensión*

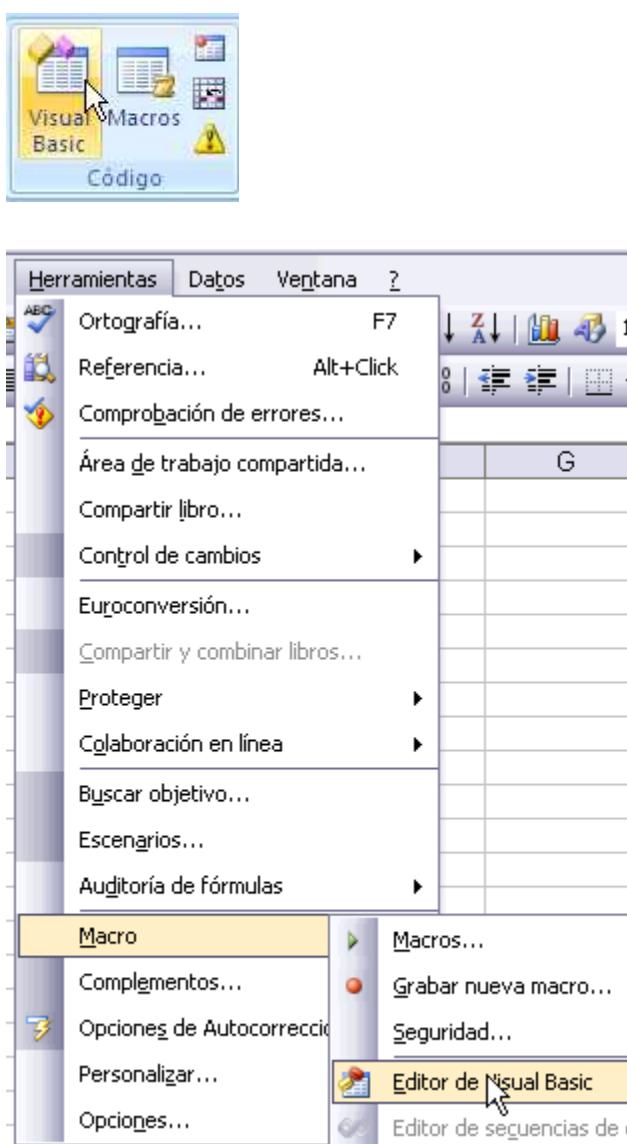
- Zona A: Todos los valores de tensión comprendidos entre el instante  $T_2$  y  $T_2 + 150$  ms.
- Zona B: Todos los valores de tensión comprendidos entre el instante  $T_2 + 150$  ms y  $T_3$
- Zona C: Todos los valores de tensión comprendidos entre  $T_3$  y el menor de los siguientes valores:  $T_4$  ó  $T_3 + 150$  ms

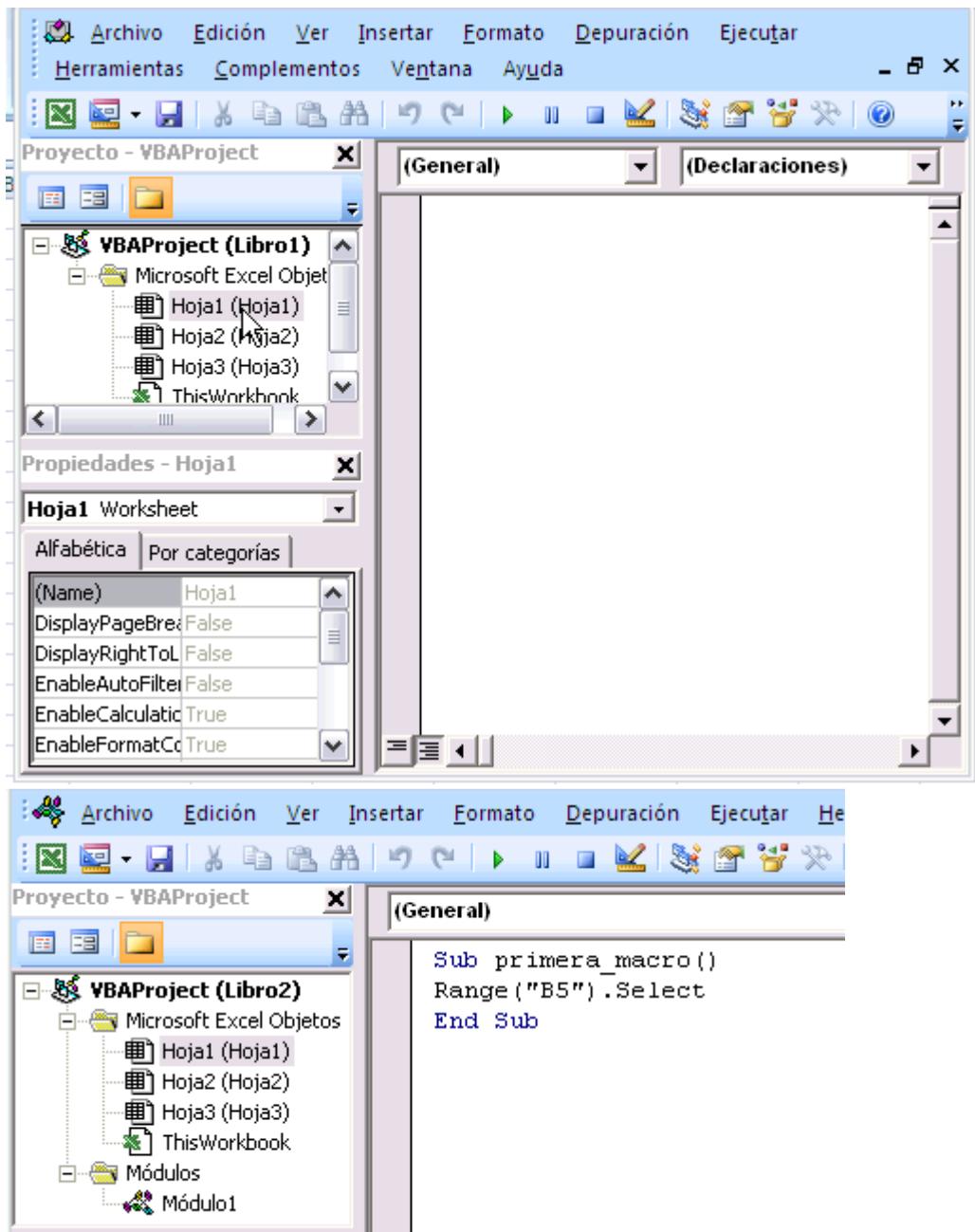
## B. CÓDIGO DEL PROGRAMA VBA

### B.1 Introducción manual VBA Excel.

Si bien la grabadora de macros es muy útil y genera un código siempre correcto, tiene dos desventajas: genera más código del necesario y sólo puede hacer macros con instrucciones secuenciales y sin nada de lógica, o sea que no pueden tomar decisiones ante un evento.

VBA es una programación que está íntimamente relacionada con los libros y las hojas de cálculo y para esto Excel cuenta con un editor de programación donde se pone el código, a este se puede acceder, en Excel 2007, yendo a la pestaña programador y luego a la sección código donde hacemos clic en Visual Basic





donde podemos ver que el código

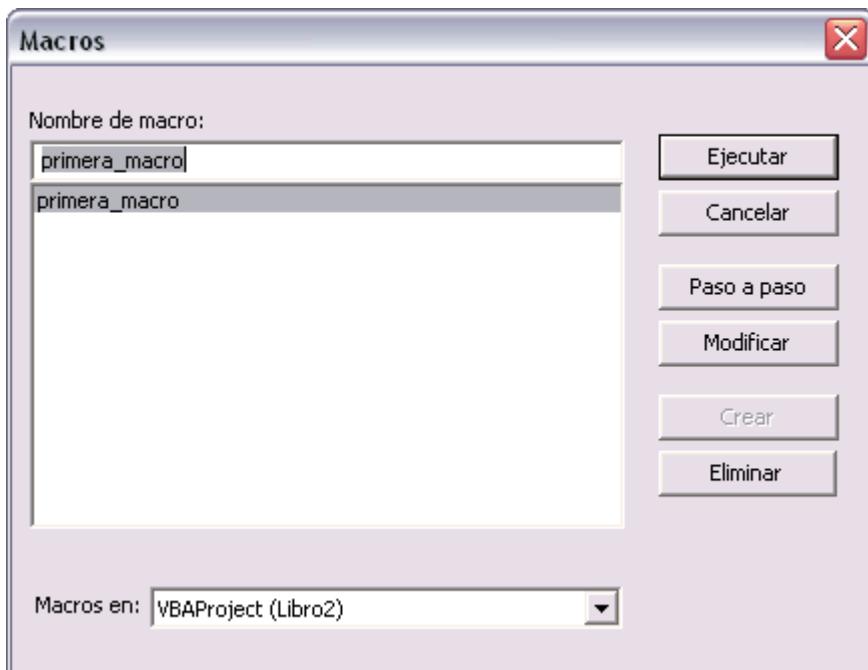
`Range ("B5") .Select`

se escribe entre "Sub" y "End Sub" y que el nombre

`primera_macro()`

no tiene espacios y termina con "( )" .Para ejecutar este código pulsamos en el

ícono o en la tecla F5 para que aparezca el panel Macros



donde puede verse el nombre de la macro que ya está seleccionada, luego pulsamos en "ejecutar" y despues en el icono  , o seleccionando " Alta + F5 que nos lleva a la pantalla con el resultado

	B5		
	A	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6			

que es la selección de la celda B5.

Otro código muy simple es escribir un valor en una celda.

Escribamos el valor 2007 en la celda D8

```
(General)
Sub Insertar_numero()
Range("D8").Value=2007
End Sub
```

y si lo queremos borrar

```
Sub borrar()
Range("D8").Delete
End Sub
```

A estas alturas estamos en condiciones de explicar estos sencillos códigos:

En la programación VBA se trabaja con OBJETOS ( Hojas, celdas, Rangos, etc) que como todo objeto, tiene propiedades, por ejemplo el objeto celda pude tener la propiedad de alto, ancho, estar seleccionada, tener un valor, o no tener ninguno, etc

En los códigos que hemos escrito tenemos los objetos Range("B5") ( celda B5) con la propiedad de estar seleccionada y el objeto Range("D8") ( celda D8) con la propiedad de tener un número (2007) y después estar vacía.

## CODIGOS MÁS SIMPLES PARA EMPEZAR

1-Seleccionar una Celda

Range("A1").Select

2-Escribir en la celda que está seleccionada en el momento actual

Activecell.FormulaR1C1="Pedro"

la combinación los códigos 1 y 2 es equivalente a esta sola línea:

Range("A1").Value=" pedro"

El uso de FormulaR1C1 sera explicado mas adelante

3-Letra Negrita

Selection.Font.Bold = True

4-Letra Cursiva

Selection.Font.Italic = True

5-Letra Subrayada

Selection.Font.Underline = xlUnderlineStyleSingle

6-Centrar Texto

With Selection

.HorizontalAlignment = xlCenter

End With

7-Alinear a la izquierda

With Selection

.HorizontalAlignment = xlLeft

End With

8-Alinear a la Derecha

With Selection

.HorizontalAlignment = xlRight

End With

9-Tipo de Letra(Fuente)

With Selection

.Font .Name = "Arial"

End With

10-Tamaño de Letra(Tamaño de Fuente)

With Selection.Font .Size = 12

End With

11-Copiar

Selection.Copy

12-Pegar

ActiveSheet.Paste

13-Cortar

## Selection.Cut

## 14-Ordenar Ascendente

```
Selection.Sort Key1:=Range("A1"), Order1:=xlAscending, Header:=xlGuess,  
OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom
```

15-Orden Descendente

```
Selection.Sort Key1:=Range("A1"), Order1:=xlDescending, Header:=xlGuess, _  
OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom
```

16-Buscar

```
Cells.Find(What:="César", After:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, LookAt:=xlPart,  
SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, MatchCase:= False).Activate
```

## 17-Insertar Fila

## Selection, EntireRow, Insert

## 18-Eliminar Fila

#### Selection, EntireRow, Delete

## 19-Insertar Columna

## Selection EntireColumn Insert

## 20-Eliminar Columna

Selection EntireColumn Delete

### 21.-Abrir un Libro

Workbooks Open Filename:= "C:\Mis documentos\Tablas dinamicas.xls"

22 Grabar un Libro

```
ActiveWorkbook.SaveAs Filename:="C:\Mis documentos\tablas.xls", FileFormat :=xlNormal, Password:="", WriteResPassword:="", ReadOnlyRecommended:= _ False, CreateBackup:=False
```

La mayoría de estos códigos se pueden verificar con la grabadora de Macros.

## Significado de la FORMULA R1C1

La FORMULA R1C1 se emplea para colocar el resultado de una línea de código en la celda que actualmente está activa

Veamos el siguiente caso

supongamos que queremos sumar los números de la columna D y que el resultado aparezca en la celda F6 que es la que está seleccionada, el código que se debería escribir es el siguiente.

```
Sub FOEMULAR1C1()
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(R[-5]C[-2]:R[-3]C[-2])"
End Sub
```

El paréntesis destacado en rojo tiene por objetivo cubrir el tango donde están los números a sumar, o sea, desplazarme 2 columnas a la izquierda [-2] con 5 y 2 filas hacia arriba es decir

[-5] y [-2]. Se entiende que R significan filas y C columnas y que anteponemos un - si nos desplazamos hacia la izquierda o hacia arriba. Cuando escribimos una función, como en el caso anterior, siempre debe ser escrita ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(R[]C[]:R[]C[])", pues el segundo igual es que caracteriza a la función y el paréntesis el rango donde se aplica. Lo que se acaba de hacer es lo mismo que colocar =SUMA(D1:D3) en la celda F6

Hasta ahora hemos hecho una breve introducción a la programación VBA , pero una cosa fundamental es entender las estructuras de control de flujo de programa, lo que faremos mediante ejemplos

Estructuras de iteración

Frecuentemente algunas líneas de código se repiten muchas veces con el consiguiente aumento del tamaño del programa. Esto se solucionado mediante los llamados estructuras de iteración, también llamadas ciclos de repetición o bucles.

Estos son:

While - Wend

Do - While - Loop

Do - Until --Loop

For - Next

For-Each-in-Next

Estructuras de decisión:

.If - Then - Else

Select - Case

Tipos de datos, funciones y subrutinas:

Tipos de datos

Funciones

Macros

## B.2 Función para que arranque el programa.

```
Sub auto_open()
    INICIO.Show
```

```
End Sub
```

Acciones de las diferentes pantallas

### *Pantalla Inicio*

*Con las siguientes acciones se pasa de una pantalla a otra pulsando el botón:*

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
INICIO.Hide  
DATOSINSTALACION.Show  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()  
INICIO.Hide  
DATOSINSTALACIONQUEST.Show  
End Sub
```

### *Pantalla datos de la instalación*

*En la siguiente acción se activa el combobox:*

```
Private Sub UserForm_Activate()  
Sheets("Hoja1").Select  
ComboBox1.AddItem "Estrella-Estrella"  
ComboBox1.AddItem "Estrella-Triangulo"  
ComboBox1.AddItem "Triangulo-Estrella"  
ComboBox1.AddItem "Estrella-Zigzag"  
End Sub  
  
Private Sub ComboBox1_Click()  
Sheets("Hoja1").Select  
Sheets("Hoja1").Range("B13").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox1  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton1_Click()  
DATOSINSTALACION.Hide  
DATOSTITT.Show  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()  
DATOSINSTALACION.Hide  
DATOSTITTRED.Show  
End
```

*Con la siguiente acción se envía el valor introducido a la correspondiente celda de Excel:*

```
Private Sub TextBox1_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B2").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox1  
End Sub  
  
Private Sub TextBox2_Change()
```

```
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B3").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox2  
End Sub  
Private Sub TextBox3_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B6").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox3  
End Sub  
Private Sub TextBox4_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B7").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox4  
End Sub  
Private Sub TextBox5_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B10").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox5  
End Sub  
Private Sub TextBox6_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B11").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox6  
End Sub  
Private Sub TextBox7_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B12").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox7  
End Sub  
Private Sub TextBox8_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("B15").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox8  
End Sub
```

*Con la siguiente acción se envía desde Excel al textbox correspondiente el valor que Excel calcula:*

```
Private Sub CommandButton5_Click()  
Sheets("Hoja1").Select  
TextBox9 = Cells(4, 2).Value  
End Sub
```

Pantalla Datos de las instalación QUEST:

```
Private Sub UserForm_Activate()  
Sheets("QUEST").Select
```

---

```
TextBox9 = Sheets("QUEST").Range("B4").Value
ComboBox1.AddItem "Estrella-Estrella"
ComboBox1.AddItem "Estrella-Triangulo"
ComboBox1.AddItem "Triangulo-Estrella"
ComboBox1.AddItem "Estrella-Zigzag"
End Sub
Private Sub ComboBox1_Click()
Sheets("QUEST").Select
Range("B13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox1
End Sub
Private Sub TextBox1_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B6").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox1
End Sub
Private Sub TextBox2_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox2
End Sub
Private Sub TextBox3_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox3
End Sub
Private Sub TextBox4_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox4
End Sub
Private Sub TextBox5_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox5
End Sub
Private Sub TextBox6_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox6
End Sub
Private Sub TextBox7_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B2").Select
```

---

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox7
End Sub
Private Sub TextBox8_Change()
Sheets("QUEST").Select
Range("B3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox8
End Sub
Private Sub CommandButton4_Click()
Sheets("QUEST").Select
TextBox9 = Sheets("QUEST").Range("B4").Value
End Sub
```

Pantalla Condiciones de ensayo (la pantalla para el QuEST es igual):

```
Private Sub UserForm_Activate()
Sheets("Hoja1").Select
ComboBox1.AddItem "1A"
ComboBox1.AddItem "1B"
ComboBox1.AddItem "2A"
ComboBox1.AddItem "2B"
ComboBox1.AddItem "3A"
ComboBox1.AddItem "3B"
ComboBox1.AddItem "4A"
ComboBox1.AddItem "4B"
ComboBox1.AddItem "5A"
ComboBox1.AddItem "5B"
ComboBox1.AddItem "6A"
ComboBox1.AddItem "6B"
ComboBox1.AddItem "7A"
ComboBox1.AddItem "7B"
ComboBox1.AddItem "8A"
ComboBox1.AddItem "8B"
ComboBox1.AddItem "9A"
ComboBox1.AddItem "9B"
ComboBox1.AddItem "10A"
ComboBox1.AddItem "10A"
ComboBox1.AddItem "11A"
ComboBox1.AddItem "11B"
ComboBox1.AddItem "12A"
ComboBox1.AddItem "12B"
ComboBox1.AddItem "13A"
ComboBox1.AddItem "13B"
ComboBox1.AddItem "14A"
ComboBox1.AddItem "14B"
ComboBox1.AddItem "15A"
```

```
ComboBox1.AddItem "15B"  
ComboBox1.AddItem "16A"  
ComboBox1.AddItem "16B"  
ComboBox1.AddItem "17A"  
ComboBox1.AddItem "17B"  
ComboBox1.AddItem "18A"  
ComboBox1.AddItem "18B"  
ComboBox1.AddItem "19A"  
ComboBox1.AddItem "19B"  
ComboBox1.AddItem "20A"  
ComboBox1.AddItem "20B"  
ComboBox2.AddItem "0"  
ComboBox2.AddItem "1,6"  
ComboBox2.AddItem "3,4"  
ComboBox2.AddItem "5"  
ComboBox2.AddItem "8,6"  
ComboBox2.AddItem "12"  
ComboBox4.AddItem "36"  
ComboBox4.AddItem "32,4"  
ComboBox4.AddItem "28,8"  
ComboBox4.AddItem "25,2"  
ComboBox4.AddItem "21,6"  
ComboBox4.AddItem "36"  
ComboBox4.AddItem "32,4"  
ComboBox4.AddItem "28,8"  
ComboBox4.AddItem "25,2"  
ComboBox4.AddItem "21,6"  
ComboBox4.AddItem "18"  
ComboBox4.AddItem "16,2"  
ComboBox4.AddItem "14,4"  
ComboBox4.AddItem "12,6"  
ComboBox4.AddItem "10,8"  
ComboBox4.AddItem "18"  
ComboBox4.AddItem "16,2"  
ComboBox4.AddItem "14,4"  
ComboBox4.AddItem "12,6"  
ComboBox4.AddItem "10,8"  
ComboBox3.AddItem "20"  
ComboBox3.AddItem "20"  
ComboBox3.AddItem "20"  
ComboBox3.AddItem "11,547"  
ComboBox3.AddItem "11,547"  
ComboBox3.AddItem "11,547"
```

---

```
ComboBox3.AddItem "11,547"
ComboBox3.AddItem "11,547"
ComboBox3.AddItem "20"
ComboBox3.AddItem "20"
ComboBox3.AddItem "20"
ComboBox3.AddItem "20"
ComboBox3.AddItem "20"
ComboBox3.AddItem "11,547"
ComboBox3.AddItem "11,547"
ComboBox3.AddItem "11,547"
ComboBox3.AddItem "11,547"
ComboBox3.AddItem "11,547"
End Sub
Private Sub ComboBox1_Click()
Sheets("Hoja1").Select
Range("D33").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox1
End Sub
```

```
Private Sub ComboBox2_Click()
Sheets("Hoja1").Select
Range("E18").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox2
End Sub
Private Sub ComboBox3_Click()
Sheets("Hoja1").Select
Range("Q9").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox3
End Sub
Private Sub ComboBox4_Click()
Sheets("Hoja1").Select
Range("Q10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox4
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()
CONDICIONESENSAYO.Hide
TRAFOPARALELO.Show
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()
CONDICIONESENSAYO.Hide
esquema.Show
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton6_Click()
Sheets("Hoja1").Select
TextBox1 = Cells(11, 17).Value
End Sub
```

*Pantalla Esquema (la pantalla Esquema QEST es similar):*

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    esquema.Hide
    CONDICIONESENSAYO.Show
End Sub
```

*Con la siguiente acción se compara el tiempo de ensayo con el tiempo máximo admisible de ensayo y devuelve el textbox en verde o con el mensaje que aparece:*

```
Private Sub Image1_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub TextBox6_Change()
```

```
    If Val(TextBox6) < Val(TextBox3) Then
        TextBox6.BackColor = &HFF00&
    ElseIf Val(TextBox6) > Val(TextBox3) Then
        TextBox6.BackColor = &HFF8&
        MsgBox ("!Cuidado superas el Tmax!")
    End If
```

```
Sheets("Hoja2").Select
```

```
Range("G6").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox6
```

```
End Sub
```

```
Private Sub TextBox7_Change()
```

```
Sheets("Hoja2").Select
```

```
Range("J2").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox7
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton9_Click()
```

```
    datos.Show
```

```
    esquema.Hide
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton7_Click()
```

```
    CONDICIONESENSAYO.Show
```

```
    esquema.Hide
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton8_Click()
```

```
    esquema.Hide
```

```
    INICIO.Show
```

```
End Sub  
Private Sub TextBox2_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("J80").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox2  
End Sub  
Private Sub TextBox5_Change()  
Sheets("Hoja1").Select  
Range("J81").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = TextBox5  
End Sub  
Private Sub UserForm_Activate()  
Sheets("Hoja1").Select  
ComboBox1.AddItem "1A"  
ComboBox1.AddItem "1B"  
ComboBox1.AddItem "2A"  
ComboBox1.AddItem "2B"  
ComboBox1.AddItem "3A"  
ComboBox1.AddItem "3B"  
ComboBox1.AddItem "4A"  
ComboBox1.AddItem "4B"  
ComboBox1.AddItem "5A"  
ComboBox1.AddItem "5B"  
ComboBox1.AddItem "6A"  
ComboBox1.AddItem "6B"  
ComboBox1.AddItem "7A"  
ComboBox1.AddItem "7B"  
ComboBox1.AddItem "8A"  
ComboBox1.AddItem "8B"  
ComboBox1.AddItem "9A"  
ComboBox1.AddItem "9B"  
ComboBox1.AddItem "10A"  
ComboBox1.AddItem "10A"  
ComboBox1.AddItem "11A"  
ComboBox1.AddItem "11B"  
ComboBox1.AddItem "12A"  
ComboBox1.AddItem "12B"  
ComboBox1.AddItem "13A"  
ComboBox1.AddItem "13B"  
ComboBox1.AddItem "14A"  
ComboBox1.AddItem "14B"  
ComboBox1.AddItem "15A"  
ComboBox1.AddItem "15B"  
ComboBox1.AddItem "16A"
```

---

```
ComboBox1.AddItem "16B"
ComboBox1.AddItem "17A"
ComboBox1.AddItem "17B"
ComboBox1.AddItem "18A"
ComboBox1.AddItem "18B"
ComboBox1.AddItem "19A"
ComboBox1.AddItem "19B"
ComboBox1.AddItem "20A"
ComboBox1.AddItem "20B"
ComboBox2.AddItem "0"
ComboBox2.AddItem "1,6"
ComboBox2.AddItem "3,4"
ComboBox2.AddItem "5"
ComboBox2.AddItem "8,6"
ComboBox2.AddItem "12"
End Sub
```

```
Private Sub ComboBox1_Click()
Sheets("Hoja1").Select
Range("D33").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox1
End Sub

Private Sub ComboBox2_Click()
Sheets("Hoja1").Select
Range("E18").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = ComboBox2
End Sub

Private Sub CommandButton5_Click()
Dim CARGATRAFO As String
Dim CARGASINTRAFO As String
Dim VACIOTRAFO As String
Dim VACIOSINTRAFO As String

CARGATRAFO = OptionButton5.Value
CARGASINTRAFO = OptionButton6.Value
VACIOTRAFO = OptionButton7.Value
VACIOSINTRAFO = OptionButton8.Value
Sheets("Hoja1").Select
If CARGATRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(45, 12).Value
    TextBox2 = Cells(51, 12).Value
    TextBox5 = Cells(50, 12).Value
    TextBox4 = Cells(49, 12).Value
    TextBox7 = Cells(45, 13).Value
End If
End Sub
```

```
TextBox3 = Cells(83, 10).Value
TextBox8 = Cells(33, 4).Value
TextBox9 = Cells(18, 5).Value
MsgBox ("has pulsado la opción CARGA/ TRAFO")
ElseIf CARGASINTRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(46, 12).Value
    TextBox2 = Cells(53, 12).Value
    TextBox5 = Cells(54, 12).Value
    TextBox4 = Cells(49, 12).Value
    TextBox7 = Cells(46, 13).Value
    TextBox3 = Cells(83, 10).Value
    TextBox8 = Cells(33, 4).Value
    TextBox9 = Cells(18, 5).Value
    MsgBox ("has pulsado la opción CARGA/SIN TRAFO")
ElseIf VACIOTRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(48, 12).Value
    TextBox2 = Cells(55, 12).Value
    TextBox5 = Cells(50, 12).Value
    TextBox4 = 0
    TextBox7 = Cells(48, 13).Value
    TextBox3 = Cells(83, 10).Value
    TextBox8 = Cells(33, 4).Value
    TextBox9 = Cells(18, 5).Value
    MsgBox ("has pulsado la opción VACIO/TRAFO")
ElseIf VACIOSINTRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(47, 12).Value
    TextBox2 = Cells(56, 12).Value
    TextBox5 = Cells(54, 12).Value
    TextBox4 = 0
    TextBox7 = Cells(47, 13).Value
    TextBox3 = Cells(83, 10).Value
    TextBox8 = Cells(33, 4).Value
    TextBox9 = Cells(18, 5).Value
    MsgBox ("has pulsado la opción VACIO/SIN TRAFO")
Else
    MsgBox ("no has seleccionado ninguna opción")
End If
End Sub
Private Sub OptionButton5_Click()
    myoption = "CARGATRAFO"
End Sub
Private Sub OptionButton6_Click()
    myoption = "CARGASINTRAFO"
End Sub
```

---

```
Private Sub OptionButton7_Click()
    myoption = "VACIOTRAFO"
End Sub
```

```
Private Sub OptionButton8_Click()
    myoption = "VACIOSINTRAFO"
End Sub
```

*Con el siguiente código se active los option button y generan los diferentes cálculos enviados a los textbox:*

```
Private Sub CommandButton10_Click()
Dim CARGATRAFO As String
Dim CARGASINTRAFO As String
Dim VACIOTRAFO As String
Dim VACIOSINTRAFO As String
CARGATRAFO = OptionButton5.Value
CARGASINTRAFO = OptionButton6.Value
VACIOTRAFO = OptionButton7.Value
VACIOSINTRAFO = OptionButton8.Value
Sheets("Hoja1").Select
If CARGATRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(45, 12).Value
    TextBox2 = Cells(51, 12).Value
    TextBox5 = Cells(50, 12).Value
    TextBox4 = Cells(49, 12).Value
    TextBox7 = Cells(45, 13).Value
    TextBox3 = Cells(83, 10).Value
    TextBox8 = Cells(33, 4).Value
    TextBox9 = Cells(18, 5).Value
    MsgBox ("has pulsado la opción CARGA/ TRAFO")
ElseIf CARGASINTRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(46, 12).Value
    TextBox2 = Cells(53, 12).Value
    TextBox5 = Cells(54, 12).Value
    TextBox4 = Cells(49, 12).Value
    TextBox7 = Cells(46, 13).Value
    TextBox3 = Cells(83, 10).Value
    TextBox8 = Cells(33, 4).Value
    TextBox9 = Cells(18, 5).Value
    MsgBox ("has pulsado la opción CARGA/SIN TRAFO")
ElseIf VACIOTRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(48, 12).Value
    TextBox2 = Cells(55, 12).Value
    TextBox5 = Cells(50, 12).Value
```

```
TextBox4 = 0
TextBox7 = Cells(48, 13).Value
TextBox3 = Cells(83, 10).Value
TextBox8 = Cells(33, 4).Value
TextBox9 = Cells(18, 5).Value
MsgBox ("has pulsado la opción VACIO/TRAFO")
ElseIf VACIOSINTRAFO = "Verdadero" Then
    TextBox1 = Cells(47, 12).Value
    TextBox2 = Cells(56, 12).Value
    TextBox5 = Cells(54, 12).Value
    TextBox4 = 0
    TextBox7 = Cells(47, 13).Value
    TextBox3 = Cells(83, 10).Value
    TextBox8 = Cells(33, 4).Value
    TextBox9 = Cells(18, 5).Value
    MsgBox ("has pulsado la opción VACIO/SIN TRAFO")
Else
    MsgBox ("no has seleccionado ninguna opción")
End If
End Sub
```

*Pantallas datos*

*Con las siguientes acciones se elabora el informe de ensayos en Word, enviando desde Excel los datos y la gráfica obtenida:*

```
Private Sub CommandButton1_Click()
Worksheets("Hoja2").ChartObjects(1).Copy
Set appWord = CreateObject("word.application")
appWord.Visible = True
appWord.Activate
appWord.Documents.Add
appWord.Selection.Paste
Dim wdApp As Word.Application
Dim wdDoc As Word.Document
Sheets("Hoja1").Select
concepto1 = Range("B6").Value
importe1 = Range("B7").Value
importe2 = Range("B8").Value
importe3 = Range("B10").Value
importe4 = Range("B11").Value
importe5 = Range("B12").Value
importe6 = Range("B13").Value
importe7 = Range("B14").Value
importe8 = Range("B15").Value
```

```
importe9 = Range("B2").Value
importe10 = Range("B3").Value
importe11 = Range("B4").Value
Set wdApp = New Word.Application
' La función FileCopy hace una copia de un archivo
Set wdDoc = wdApp.Documents.Open("C:\Users\Usuario\Desktop\EQUIP.docx")
' Con la siguiente linea se quita el marcador1 del archivo de Word y se pone en su lugar
el contenido de la variable concepto1
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador1").Range.Text = concepto1
' Con la siguiente linea se quita el marcador2 del archivo de Word y se pone en su lugar
el contenido de la variable importe1
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador2").Range.Text = importe1
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador3").Range.Text = importe2
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador4").Range.Text = importe3
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador5").Range.Text = importe4
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador6").Range.Text = importe5
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador7").Range.Text = importe6
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador8").Range.Text = importe7
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador9").Range.Text = importe8
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador10").Range.Text = importe9
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador11").Range.Text = importe10
wdDoc.Bookmarks.Item("marcador12").Range.Text = importe11
wdApp.Visible = True
Set wdApp = Nothing
Set wdDoc = Nothing
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()
datos.Hide
INICIO.Show
End Sub
```